

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BAIXO TOCANTINS
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL
BIANCA ARAUJO SIQUEIRA

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DA TÉCNICA DE SENSORES DUPLOS DE
CONDUTIVIDADE PARA A OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE BOLHAS
USANDO FILMAGEM

ABAETETUBA – PA

2014

BIANCA ARAUJO SIQUEIRA

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DA TÉCNICA DE SENSORES DUPLOS DE
CONDUTIVIDADE PARA A OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE BOLHAS
USANDO FILMAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Universitário do Baixo Tocantins, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Industrial.

Orientador: Profº. M. Sc. Paulo Roberto Ribeiro Marques.

ABAETETUBA – PA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Siqueira, Bianca Araújo.
CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DA TÉCNICA DE SENSORES
DUPLOS DE CONDUTIVIDADE PARA A OBTENÇÃO DA
VELOCIDADE DE BOLHAS USANDO FILMAGEM / Bianca
Araújo Siqueira. — 2014.
68 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Paulo Roberto Ribeiro Marques
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de
Engenharia Industrial, Abaetetuba, 2014.

1. Sensores Eletorresistivos. 2. Correlação de Imagem
Digital. 3. Escoamento Bifásico. 4. Análise de Incertezas. 5.
Erros de Medição. I. Título.

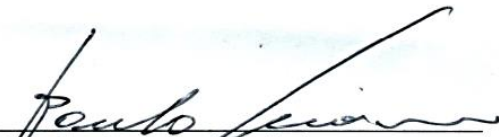
CDD 620

BIANCA ARAUJO SIQUEIRA

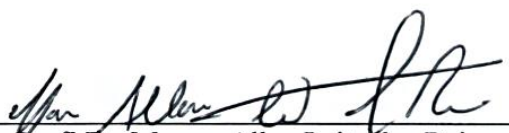
**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DA TÉCNICA DE SENSORES DUPLOS DE
CONDUTIVIDADE PARA A OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE BOLHAS
USANDO FILMAGEM**

Esse trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado, para obtenção de Título de Bacharelado em Engenharia Industrial pelo corpo docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Baixo Tocantins.

Abaetetuba, 03 de Junho de 2014



Profº.Me. Paulo Roberto Ribeiro Marques
UFPA
Orientador



Profº.Dr. Marcos Allan Leite dos Reis
UFPA
Avaliado



Profº.Dr.Silvio Bispo do Vale
UFPA
(Avaliador)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a graça de entrar em uma faculdade e estar sempre comigo, principalmente nas dificuldades.

À minha família pelo apoio incondicional e compreensão.

Ao professor Marcelo de Oliveira e Silva pela oportunidade de participar do projeto do qual resultou este trabalho e pela confiança depositada em mim.

Ao meu orientador Prof. M. Sc. Paulo Roberto Ribeiro Marques pelo apoio dado para conclusão deste trabalho.

Às minhas amigas e companheiras de projeto Dayse Dias e Lorrany Barbosa pelo companheirismo e paciência durante o tempo de execução deste projeto.

À todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus,
não sou o que era antes”.

(Martin Luther King)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo descrever a construção de um sensor duplo de condutividade, também chamado sensor eletrorresistivo, e aferir a precisão da técnica eletrorresistiva na determinação da velocidade de ascensão de bolhas em escoamento bifásico formado de água e ar, ao realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos com o método da correlação de imagens digitais. Para isso, foram feitas dez réplicas de cada volume de 1, 2, 3, 4 e 5 mililitros (ml) de bolhas de ar a fim de calcular sua velocidade de ascensão em uma mistura de água e acetato de sódio. Todo o aparato experimental necessário na técnica dos sensores eletrorresistivos foi montado e uma filmadora comercial foi colocada em frente para filmar o processo. Assim, obteve-se resultados para técnica dos sensores eletrorresistivos e foram extraídas imagens dos vídeos gravados pela filmadora as quais foram utilizadas para aplicação do método da correlação de imagens digitais. Os resultados de ambas as técnicas foram tabelados e tratados estatisticamente, ou seja, foi realizada uma análise de incertezas, utilizando os conceitos da distribuição t-Student. Estes quando comparados apresentaram grande discrepância de valores, devido a erros de medição inerentes ao processo. As bolhas maiores apresentaram os resultados mais discrepantes, exceto os volumes de 1 e 2 ml onde os intervalos de erro se interceptaram.

Palavras-chaves: Sensores Eletrorresistivos. Correlação de Imagem Digital. Escoamento Bifásico. Análise de Incertezas. Erros de Medição.

ABSTRACT

This paper aims to describe the construction of a double conductivity sensor, also called electroresistivity sensor and measure the accuracy of electroresistivity technique in determining the speed of the rise of bubbles formed in two-phase flow of water and air, to perform a comparative analysis with the results obtained with the method of digital image correlation. For this ten replicates of each volume of 1, 2, 3, 4 and 5 milliliters (ml) of air bubbles were taken to calculate the speed of ascent in a mixture of water and sodium acetate. All the experimental apparatus needed in the electroresistivity sensors technique was mounted and a commercial camera was placed in front to film the process. Thus, we obtained results for the electroresistivity sensors technique and images were extracted by videos recorded by camcorder which were used for applying the digital image correlation method. The results of both techniques were tabulated and treated statistically, ie an uncertainty analysis was performed, using the concepts of the Student-t distribution. This comparison showed large discrepancy of values due to measurement errors inherent in the process. The larger bubbles showed the most discrepant results except volumes 1 and 2 ml where the error intervals intercepted up.

Keywords: Electroresistivity Sensors. Digital Image Correlation. Two-phase Flow. Uncertainty Analysis. Measurement Errors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Padrões de escoamento bifásico vertical segundo Taitel, Barnea e Dukler (1980).....	16
Figura 2 – Mapa de previsão de transição entre os padrões de escoamento segundo Taitel et al.....	17
Figura 3 – Escala de cinza.....	18
Figura 4 – ZOI (<i>Zone of interest</i>).....	19
Figura 5 – ZOI em uma imagem.....	19
Figura 6 – Comparação de ZOI da imagem original com a transformada.....	20
Figura 7 – Parâmetros do cálculo de deslocamentos.....	20
Figura 8 – Curva da distribuição de probabilidade Normal.....	22
Figura 9 – Áreas sob a curva da distribuição de probabilidade Normal.....	22
Figura 10 – Curva Normal padronizada.....	24
Figura 11 – Gráfico da função densidade de probabilidade de um t de Student com 10 graus de liberdade.....	25
Figura 12 – Força de empuxo atuando sobre corpos.....	28
Figura 13 – Seção transversal de um barco flutuante e força de empuxo sobre ele.....	29
Figura 14 – Circuito eletrônico.....	32
Figura 15 – Esquema da instrumentação utilizada na medição de escoamentos multifásicos.....	33
Figura 16 – Agulhas de acupuntura usadas na construção do sensor.....	34
Figura 17 – Ranhuras sendo feitas na agulha (esquerda) e fio desencapado sendo enrolado na agulha (direita).....	35
Figura 18 – Clorofórmio e tinta isolante usados no revestimento.....	36
Figura 19 – Sensor com a ponta exposta sobre escala de 0,5 mm.....	36
Figura 20 – Sensor duplo sobre régua de 0,5 mm.....	37
Figura 21 – Medidas para o cálculo da velocidade e corda de uma bolha.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representação da tabela utilizada para calcular com precisão a distância entre as pontas dos sensores.....	38
Tabela 2 – Resultado da velocidade de ascensão das bolhas utilizando a técnica dos sensores eletrorresistivos.....	41
Tabela 3 – Média, desvio-padrão e erro percentual das medidas de velocidade pela técnica dos sensores eletrorresistivos.....	43
Tabela 4 – Intervalo de confiança e dados da distribuição <i>t-student</i> utilizados.....	43
Tabela 5 – Resultado da velocidade de ascensão das bolhas utilizando o método da correlação de imagem digital.....	44
Tabela 6 – Média, desvio-padrão e erro percentual das medidas de velocidade pelo método da correlação de imagem digital.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	11
1.2.1 Objetivo Geral.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos.....	11
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 TÉCNICA ELETORRESISTIVA.....	13
2.2 REGIMES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM DUTOS VERTICAIS.....	15
2.3 MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL.....	17
2.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	21
2.4.1 Distribuição Normal.....	21
2.4.2 Distribuição t de Student.....	24
2.4.2.1 <i>Propriedades da distribuição t de Student.....</i>	<i>24</i>
2.4.2.2 <i>Função geradora de momentos, Valor esperado e Variância.....</i>	<i>26</i>
2.5 PRINCÍPIOS DE FÍSICA.....	26
2.5.1 Empuxo.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA TÉCNICA ELETORRESISTIVA.....	30
3.2 APARATO EXPERIMENTAL.....	31
3.3 CONSTRUÇÃO DOS SENSORES.....	33
3.3.1 Determinação da distância entre as pontas do sensor duplo de condutividade.....	37
3.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 RESULTADOS DA TÉCNICA DOS SENSORES ELETORRESISTIVOS.....	41
4.2 RESULTADOS DO MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL.....	44
4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXOS.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Existem muitas razões para se estudar os escoamentos bifásicos, uma vez que existe uma quantidade considerável de problemas em processos industriais que envolvem a medição de fluxos que apresentam mais de uma fase. Entre os diversos tipos de escoamentos bifásicos existentes o de líquido e gás destaca-se pela sua presença na indústria química, petrolífera e em reatores nucleares.

Em um escoamento bifásico, as fases distribuem-se de maneira muito particular, formando diversos arranjos topológicos, denominados padrões de escoamento. Tais arranjos topológicos são estruturas dinâmicas no escoamento, determinadas por propriedades físicas das fases, dimensões do sistema e condições operacionais. Identificar tais arranjos e medir as variáveis envolvidas muitas vezes não é um trabalho fácil, visto que nem sempre é possível fazer a identificação visual e determinar com precisão o volume de cada fase.

Um exemplo bastante claro desta problemática é o que ocorre na flotação, técnica de separação de misturas que consiste na introdução de bolhas de ar a uma suspensão de partículas. As partículas aderem às bolhas, devido à tensão superficial, e formam uma espuma que se acumula na superfície sendo os componentes posteriormente removidos da solução. A aplicação na separação de minerais é o emprego mais convencional da flotação, seguido de seu uso na recuperação de corantes em indústrias de papel, tratamento de água e esgoto. Recentemente, a flotação também vem sendo utilizada em processos como despoluição de rios, separação de plástico e até mesmo separação de microrganismos (MASSI et al., 2008). As bolhas de ar injetadas na solução devem possuir volume e quantidades adequadas para uma boa captação das partículas, porém a maioria das soluções não é translúcida o suficiente para permitir o controle das bolhas. Assim, a implantação de meios para medir a fração de vazio torna-se essencial para a otimização do processo.

Sabe-se que além da otimização do processo medir as variáveis tem um impacto econômico significativo uma vez que os recursos deverão ser dimensionados tendo em vista a capacidade de produção que se deseja atingir e a fim de evitar desperdícios. Para isto, é necessário um sistema de medição que possibilite conhecer e controlar o processo.

Visto a necessidade de controlar as variáveis e parâmetros presentes em um escoamento bifásico, este trabalho tem como objetivo descrever a técnica de medição com sensores eletrorresistivos e determinar sua eficácia em comparação com técnica de medição

de velocidade e corda de bolhas utilizando análise de imagens obtidas por filmadora. O aparato utilizado apresenta baixo custo se comparado ao de outras técnicas que necessitam de equipamentos mais robustos e caros. Além disso, o processo de medição é menos complexo e o sensor, principal elemento de transmissão de sinais, pode ser feito artesanalmente. O ambiente de realização dos experimentos foi uma das salas de professores da Universidade Federal do Pará/Campus de Abaetetuba, uma vez que foi inviável a realização do mesmo no laboratório de química.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar a velocidade obtida com a técnica dos sensores duplos de condutividade, cujo princípio de funcionamento se baseia na eletrorresistividade, com o método da correlação de imagens digitais, a fim de verificar o grau de precisão dos resultados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho limita-se na análise experimental do cálculo da velocidade de bolhas de ar com volumes de 1, 2, 3, 4 e 5 ml em regime de escoamento vertical ascendente tipo golfada (*Slug flow*) em um tubo de vidro com 100 mm de altura e 15 mm de diâmetro interno. A análise é feita pelo cálculo da velocidade através de duas técnicas distintas: a primeira utiliza sensores duplos de condutividade que captam sinais de condução e não-condução e os transmitem para um circuito onde será processado, armazenado e tratado estatisticamente; a segunda técnica, também utilizada para calibração do sensor, consiste em identificar regiões de interesse em imagens digitais e, com a ajuda de um microscópio e *softwares*, determinar o espaço (em milímetros) a partir do número de *pixels*. As técnicas são aplicadas simultaneamente, porém o tratamento dos dados é realizado separadamente e depois comparados estatística e graficamente.

O que se pretende ao final do trabalho é aferir a precisão da técnica dos sensores duplos de condutividade e com base nisto avaliar a viabilidade de tal técnica ser aplicada a sistemas reais de escoamento bifásico vertical.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por cinco capítulos:

No capítulo 1 são descritas as diversas situações onde pode-se encontrar escoamentos bifásicos e a motivação para este trabalho, além do resumo da metodologia e objetivos.

No capítulo 2 é estabelecida a fundamentação teórica do trabalho necessária para o estudo e análise dos resultados tal como: a descrição da contribuição de diversos autores para evolução da técnica eletrorresistiva, descrição dos padrões de escoamento vertical ascendente, conceitos do método da correlação de imagem digital, os principais métodos para tratamento estatístico utilizados em processos de medição de variáveis e o conceito de força de empuxo ou princípio de Arquimedes.

No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos utilizados. Neste capítulo é descrito o princípio de funcionamento da técnica eletrorresistiva, os equipamentos utilizados e sua respectiva função no processo de medição, é detalhado o processo de construção de um sensor eletrorresistivo e a aplicação do método da correlação de imagem digital para determinação da distância entre as pontas dos sensores. Por fim, é descrita a metodologia utilizada nas medições.

No capítulo 4 são mostrados os resultados de cada técnica e a comparação dos mesmos. Também é feita uma breve consideração sobre os resultados obtidos.

No capítulo 5 constam as considerações finais do trabalho, com justificativas sobre os resultados alcançados e sugestões para melhoria da precisão dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta as principais informações da literatura necessárias para compreender e embasar as análises feitas ao longo do trabalho. Para isto, este capítulo foi dividido em 4 seções: na primeira seção é feita a revisão bibliográfica quanto aos diversos estudos já realizados sobre a técnica eletrorresistiva, elencando-se os trabalhos mais relevantes. Na segunda seção são descritos os padrões de escoamento vertical ascendente identificados em 1980 pelos autores Taitel, Barnea e Dukler. Na seção 3 são descritos os principais conceitos do método de correlação de imagem digital, técnica com a qual será comparada a técnica eletrorresistiva e na seção 4 são descritas as distribuições de probabilidade normal e t-Student, com o objetivo de caracterizar os dados coletados nas medições e tratá-los estatisticamente de forma correta. Por fim, a seção 5 discute sobre o princípio de Arquimedes que rege a ascensão da bolha.

2.1 TÉCNICA ELETRORESISTIVA

Para medir parâmetros bifásicos existem na literatura diversas técnicas que vem sendo desenvolvidas ao longo dos anos. Uma das divisões que se pode estabelecer para estas técnicas é quanto à interação do sensor com a mistura bifásica em escoamento, ou seja, em técnicas invasivas e não-invasivas. Outra é pelo princípio pelo qual o sensor capta o sinal: ultrassom, eletrorresistividade, capacitância etc. A técnica abordada neste trabalho propõe sensores eletroresistivos e é invasiva no sistema, porém estudos já realizados indicam bons resultados nas medições. A seguir é feita uma revisão bibliográfica listando-se as principais contribuições para o desenvolvimento da técnica.

HOFFER e RESNICK (1975) melhoraram de forma considerável a técnica que utiliza sensores eletroresistivos, fazendo alterações no circuito e no tratamento dos sinais, o que viabilizou a detecção de bolhas de diâmetro pequeno, entre 0,1 e 0,3 mm. Estas modificações foram necessárias, pois os sensores não possuíam as dimensões adequadas para percepção de bolhas pequenas. Eles ainda utilizaram uma tensão de corte para limitar os pulsos gerados, os quais eram posteriormente amplificados. Isso permitiu uma redução no tamanho dos sensores facilitando a medição de bolhas de tamanhos médios e áreas interfaciais.

THANG e DAVIS (1979) utilizam uma técnica eletroresistiva para medir a fração de vazio, velocidade das bolhas e função de densidade de probabilidade em um escoamento bifásico, formado de água e ar, através de um tubo de Venturi. Apesar de ser uma técnica

intrusiva, através dos resultados bidimensionais da fração de vazio e velocidade foi possível observar a coalescência das bolhas na região convergente bem como a fragmentação das mesmas na região divergente. Os sensores foram calibrados e obteve-se um erro na faixa de entre 3,3% e 6,7%.

HARDY e HYLTON (1984) desenvolveram um sistema de medição de velocidade e de fração de vazio em um escoamento bifásico (água-ar) utilizando sensores de impedância. A velocidade da mistura era avaliada através da análise dos sinais obtidos em dois sensores separados espacialmente. A fração de vazio era mensurada através das técnicas de capacitância e condutância. Os sensores mostraram-se robustos e precisos para misturas de água-ar e de vapor-água.

GERAETS e BORST (1987) utilizaram a técnica do tipo capacitância para medição em escoamentos bifásicos. Foram obtidas medições de fração de vazio, e padrões de escoamento foram muito bem identificados. O sensor possuía uma configuração helicoidal diferente das geometrias utilizadas de tubo dielétrico. Na maior parte dos regimes de escoamento, a fração de vazio foi medida com uma precisão de aproximadamente +0,3%. Devido ao comprimento axial do sensor ser extenso a medição de fração de vazio local não foi possível.

IGUCHI, NAKATANI e KAWABATA (1997) desenvolveram uma sonda multiagulha, cujo princípio de funcionamento é a detecção da eletrorresistividade, a fim de determinar características de bolhas (resistência do gás, frequência, velocidade de ascensão e comprimento da corda) em banhos de metal fundido. Primeiramente, eles realizaram o experimento em um sistema aquoso e obtiveram resultados satisfatórios em comparação com os respectivos valores obtidos pelos sensores duplos de condutividade. A forma de cada bolha detectada com a sonda eletrorresistiva multiagulha foi muito similar à observada com uma câmera de vídeo de alta velocidade. Este sensor foi sequencialmente aplicado em um sistema metal de Wood (*Wood's metal-He*) para esclarecer a forma de bolhas de gás inerte em banhos de metal fundido.

KESKA e WILLIAMS (1999) desenvolveram um aparato experimental que permite a comparação simultânea da eficiência de quatro técnicas diferentes, na medição de um escoamento vertical. Cada técnica foi avaliada quanto aos parâmetros medidos e a sensibilidade de medir o tipo de escoamento. Os resultados obtidos mostram que existem diferentes potenciais no reconhecimento dos diversos padrões de escoamento. Os sinais obtidos pelos sensores capacitivos e resistivos demonstraram um grande potencial na maior parte dos escoamentos. Os obtidos pelos sensores de pressão apresentaram a metade da

capacidade de reconhecimento dos padrões quando comparados aos capacitivos e resistivos. Os sensores ópticos foram os mais limitados.

COSTA, SASSIM e FRANÇA (2007) desenvolveram uma técnica que utiliza a medição da condutividade elétrica de uma mistura bifásica gás-líquido que circunda duas sondas elétricas de fios paralelas colocadas diametralmente na seção de uma tubulação, intrusivas no escoamento, para a caracterização hidrodinâmica do escoamento intermitente vertical, ou escoamento pistonado – *slug flow* a fim de obter sinais dinâmicos e variáveis típicos das estruturas que formam este escoamento: a bolha de Taylor, circundada por um filme de líquido de pequena espessura, e a massa de líquido aerada que a sucede, contendo pequenas bolhas dispersas. A técnica tem uso em laboratórios de pesquisa, em aplicações com fluidos específicos, em condições operacionais controladas.

2.2 REGIMES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM DUTOS VERTICAIS

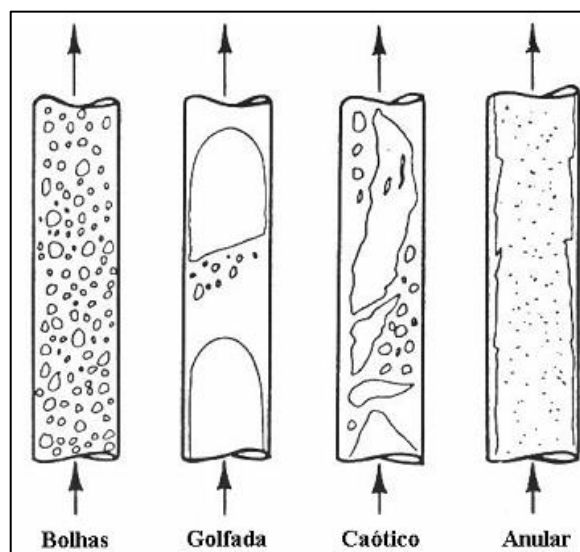
Na década de 1980 vários autores trabalharam para identificar e modelar os diversos arranjos topológicos presentes em um escoamento bifásico líquido-gás. No escoamento vertical ascendente destaca-se o trabalho de Taitel, Barnea e Dukler (1980) os quais identificaram 4 padrões básicos de escoamento:

- Bolhas (*Bubble flow*): neste tipo de escoamento a fase gasosa se encontra dispersa em forma de pequenas bolhas no meio líquido que permanece contínuo. Este tipo de escoamento ocorre tipicamente para baixas velocidades superficiais de gás.
- Golfada (*Slug flow*): no escoamento vertical o regime de golfadas é normalmente simétrico em relação à linha de centro da tubulação. Aumentando a velocidade da fase gasosa as bolhas pequenas tendem a se aglomerar formando uma bolha maior cujo diâmetro atinge dimensão similar ao da tubulação. Quando isto ocorre, formam-se bolhas grandes denominadas bolhas de Taylor. Com isto, golfadas de gás e líquido se sucedem na tubulação com a golfada de líquido apresentando pequenas bolhas dispersas. Entre as bolhas de Taylor e a parede da tubulação uma fina camada de líquido escoar para baixo.
- Transição ou caótico (*Churn flow*): este escoamento é similar ao de golfadas, porém é muito mais caótico e desordenado. Com as velocidades de gás e líquido maiores do que no caso anterior, a quebra das bolhas do escoamento em golfadas conduz a um padrão instável e desordenado, onde existe um movimento oscilatório de líquido para cima e para baixo na tubulação. No padrão caótico, ambas as fases são descontínuas.

- Anular (*Annular flow*): o escoamento anular é caracterizado por uma fase contínua de gás escoando ao longo do núcleo da tubulação. O líquido escoa próximo a parede do duto formando um filme com bolhas dispersas, e o gás escoa no centro da tubulação, carregando gotículas de líquido. Este padrão ocorre com altas velocidades de gás e altas concentrações de gás.

A figura 1 abaixo ilustra os padrões básicos de escoamento identificados por Taitel, Barnea e Dukler.

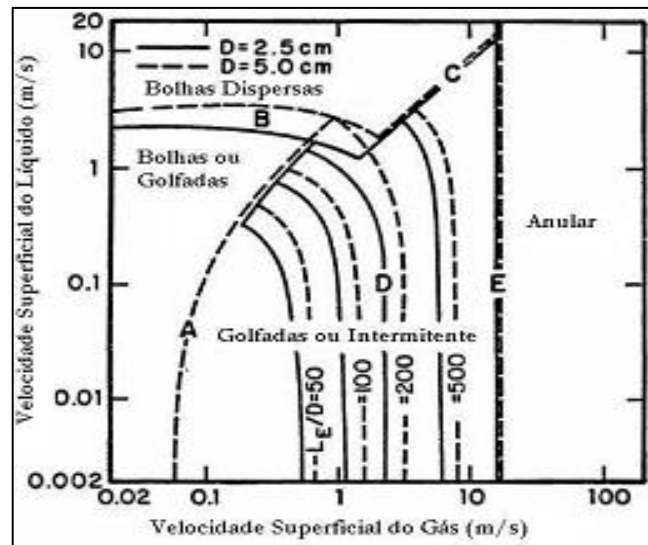
Figura 1 – Padrões de escoamento bifásico vertical segundo Taitel, Barnea e Dukler (1980)



Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2007).

Os autores também desenvolveram um modelo para a previsão dos padrões de escoamento bifásicos em tubos verticais. Eles realizaram um balanço da quantidade de movimento de cada uma das fases para avaliar os mecanismos de transição entre os padrões de escoamento. Com base nos dados obtidos foi feito um mapa de vazão (FIG. 2) que delimita os valores onde cada escoamento foi observado.

Figura 2 – Mapa de previsão de transição entre os padrões de escoamento segundo Taitel et al.



Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2007).

2.3 MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

O Método da correlação de imagens digitais (*Digital Image Correlation* - DIC) tem se tornado uma técnica experimental popular em experimentos mecânicos, devido sua simplicidade, flexibilidade, baixo custo e requerer equipamentos fáceis de manusear. Como qualquer outra técnica experimental a precisão da medição é uma questão-chave na DIC. É universalmente aceito que a precisão da medição de deslocamento da DIC é sobre vários centésimos de um pixel e é afetada por vários fatores como brilho e contraste da imagem.

A correlação de imagem digital foi primeiramente aplicada por Chu et al. (1985), Peters and Ranson (1982), Peters et al. (1983) e seu princípio básico é comparar a mesma região de imagens de um objeto obtidas em diferentes instantes de tempo com o objetivo de calcular o deslocamento desta área.

Em informática e em foto numérica, uma imagem é constituída de um conjunto de elementos chamados *pixel*. O pixel é uma unidade de superfície que permite definir a base de uma imagem numérica, ou seja, o pixel é o menor elemento constituinte de uma imagem. A unidade de medida mais comum é o megapixel que corresponde a uma superfície de 1000x1000 pixel.

Uma imagem digital pode ser considerada como uma matriz de pixels distribuídos em um eixo cartesiano x, y. Em uma imagem colorida, a cada pixel está associada uma cor que possui três componentes de nível de brilho (vermelho, verde, azul), variando-se a intensidade de cada componente são obtidas diversas cores. Para o cálculo de deslocamentos é

conveniente trabalhar com uma imagem em preto e branco reduzindo as componentes de brilho a uma escala que é denominada de escala de cinza. Os valores na escala de cinza variam no intervalo de 0 (preto) a 255 (branco), conforme ilustra a figura 3 abaixo:

Figura 3 – Escala de cinza

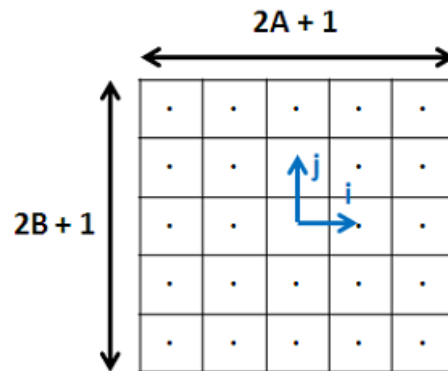


Fonte: Bentes (2010, pp. 11).

Existem vários programas computacionais que podem codificar uma imagem colorida para escala de cinza. Neste trabalho foi utilizado o software *VirtualDubMod*, cujos filtros *Grayscale*, *Levels* e *Resize* aplicados nas imagens coloridas transformaram-nas em imagens em tons de cinza.

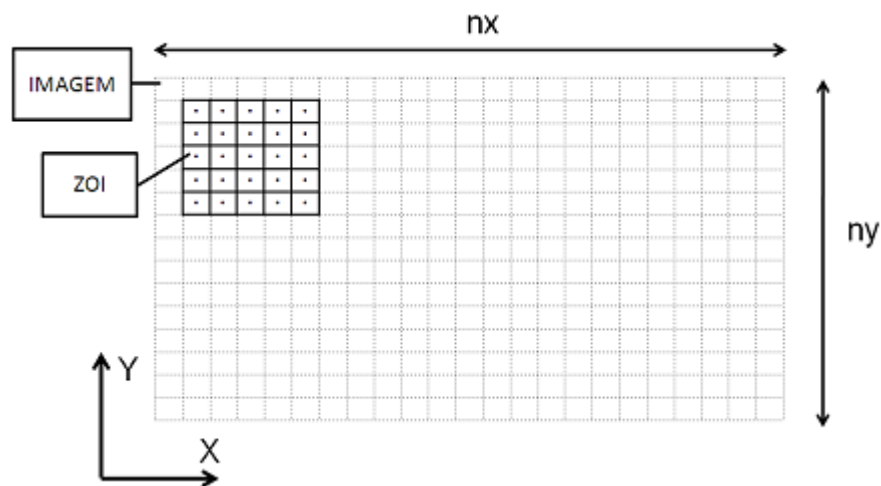
A correlação de Imagem Digital aplicada a uma imagem em preto e branco consiste na comparação intensa de dados entre dois campos de pixel, obtidas em intervalos de tempo diferentes de um experimento. O primeiro é o campo de referência, representando a imagem inicial. O segundo é o campo de pixel mostrando a imagem deformada do elemento. Uma grade de pontos é estabelecida na imagem de referência e o deslocamento ao longo de todo o campo é mapeado em relação a estes pontos. Como os valores de escala de cinza estão entre 0 e 255 e uma imagem possui milhares de pixels haverá diversos pixels com o mesmo valor de escala de cinza o que acarretaria em resultados errôneos. Para solucionar este problema é necessária a introdução do conceito de ZOI (*Zone of interest*): uma região com quantidade de pixels conhecida cujo centro é a origem dos vetores i e j . A FIG. 4 ilustra o conceito de ZOI como uma região formada por uma matriz de pixels, em seguida a FIG. 5 apresenta a ZOI como uma região de interesse de uma imagem.

Figura 4 – ZOI (Zone of interest)



Fonte: Bentes (2010, pp. 13).

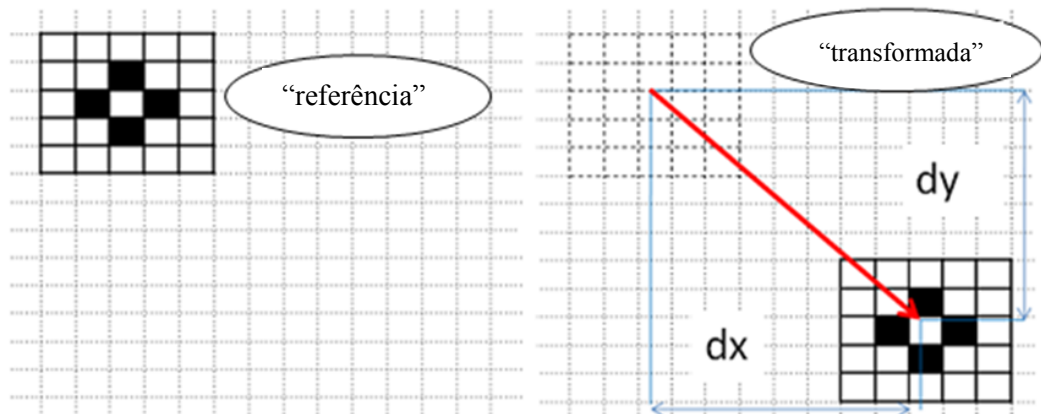
Figura 5 – ZOI em uma imagem



Fonte: Bentes (2010, pp. 13).

Com a introdução do conceito de ZOI, a análise das imagens continua sendo de *pixel* a *pixel* de uma ZOI de referência a uma ZOI transformada conforme se observa na FIG. 6. O campo de deslocamento obtido seria resultado da pesquisa em uma determinada região da imagem transformada da ZOI semelhante em relação à ZOI de referência.

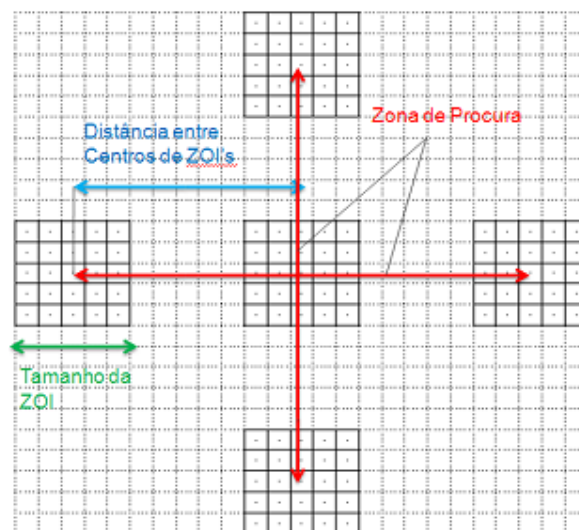
Figura 6 – Comparação de ZOI da imagem original com a transformada



Fonte: Bentes (2010, pp. 14).

Existem três parâmetros que influenciam na identificação da ZOI equivalente na imagem transformada: tamanho da ZOI, zona de procura e distância entre centros de ZOI. O tamanho da ZOI influencia na precisão dos resultados, pois mais pixels serão comparados e a identificação da ZOI será mais eficiente. A zona de procura define a área de varredura da ZOI transformada, se esse parâmetro não for bem dimensionado é possível que se encontre uma ZOI que não é a semelhante, mas é aquela que, na região de varredura, mais se assemelha a ZOI de referência. A distância dos centros de ZOI implica diretamente na quantidade de resultados obtidos, ou seja, quanto menor a distância de ZOI, mais valores de deslocamento serão calculados. A FIG. 7 ilustra os parâmetros importantes no cálculo de uma ZOI: distância, tamanho e zona de procura.

Figura 7 – Parâmetros do cálculo de deslocamentos



Fonte: Bentes (2010, pp. 16).

2.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Nesta seção são descritas as distribuições de probabilidade Normal e t-Student, com o objetivo de dar embasamento ao tratamento estatístico que será dado aos valores tabelados no capítulo 4.

2.4.1 Distribuição Normal

A distribuição normal conhecida também como distribuição gaussiana é sem dúvida a mais importante distribuição contínua. Sua importância se deve a vários fatores, entre eles pode-se citar o teorema central do limite, o qual é um resultado fundamental em aplicações práticas e teóricas, pois ele garante que mesmo que os dados não sejam distribuídos segundo uma normal, a média dos dados converge para uma distribuição normal conforme o número de dados aumenta. Além disso, diversos estudos práticos tem como resultado uma distribuição normal. Pode-se citar como exemplo a altura de uma determinada população em geral segue uma distribuição normal. Entre outras características físicas e sociais tem um comportamento gaussiano, ou seja, segue uma distribuição normal.

Definição: Uma variável aleatória contínua X tem distribuição Normal se sua função densidade de probabilidade for dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad x \in (-\infty, \infty). \quad (1)$$

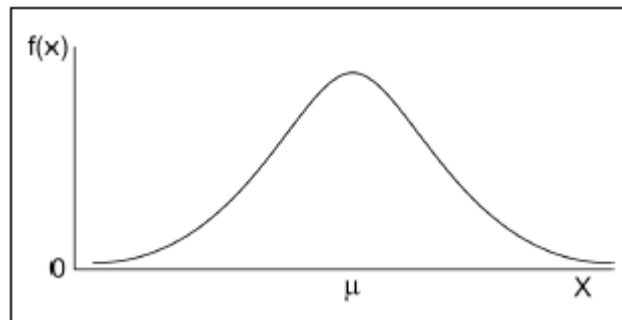
Usa-se a notação $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

A variação natural de muitos processos industriais é realmente aleatória. Embora as distribuições de muitos processos possam assumir uma variedade de formas, muitas variáveis observadas possuem uma distribuição de frequências que é, aproximadamente, uma distribuição de probabilidade Normal.

Probabilidade é a chance real de ocorrer um determinado evento, isto é, a chance de ocorrer uma medida em um determinado intervalo. Por exemplo, a frequência relativa deste intervalo, observada à partir de uma amostra de medidas, é a aproximação da probabilidade. E a distribuição de frequências é a aproximação da distribuição de probabilidades.

A distribuição é normal quando tem a forma de "sino", conforme exemplifica a FIG. 8:

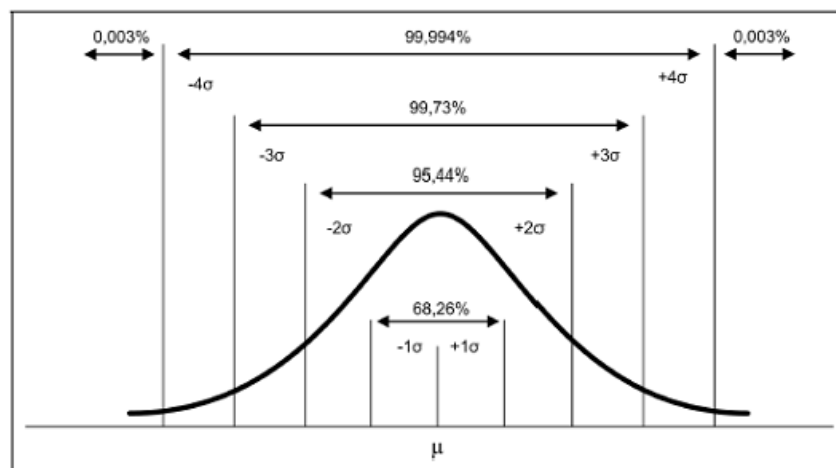
Figura 8 – Curva da distribuição de probabilidade Normal



Fonte: Portal Action (2014).

Para achar a área sob a curva normal devemos conhecer dois valores numéricos, a média μ e o desvio padrão σ . A FIG. 9 a seguir mostra algumas áreas importantes:

Figura 9 – Áreas sob a curva da distribuição de probabilidade Normal



Fonte: Portal Action (2014).

O intervalo de confiança é uma faixa de possíveis valores em torno da média amostral, em que há probabilidade de que esta faixa realmente contenha o valor real da média da população. O intervalo de confiança tem uma certa probabilidade chamada *nível de confiança* (simbolizada por $1 - \alpha$) de conter a média da população.

$$P(\bar{x} - e \leq \mu \leq \bar{x} + e) = 1 - \alpha \quad (2)$$

O intervalo de confiança é denotado por:

$$\bar{x} - e \leq \mu \leq \bar{x} + e \quad (3)$$

Ou

$$\mu = \bar{x} \pm e \quad (4)$$

Onde e representa o percentual de erro.

Se o desvio padrão da população é conhecido a média, o desvio padrão e o erro são calculados respectivamente por:

$$\mu: \bar{X} \pm z. \sigma_{\bar{X}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$$e = z. \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Quando o desvio padrão da população não é conhecido, usa-se o desvio padrão da amostra como estimativa, substituindo-se σ_x por S_x nas equações. Isto não acarreta maiores dificuldades, pois o desvio padrão amostral dá uma aproximação bastante razoável do verdadeiro valor, na maioria dos casos. Se o desvio padrão da população é desconhecido a média e o erro são calculados respectivamente por:

$$\mu = \bar{X} \pm z. \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

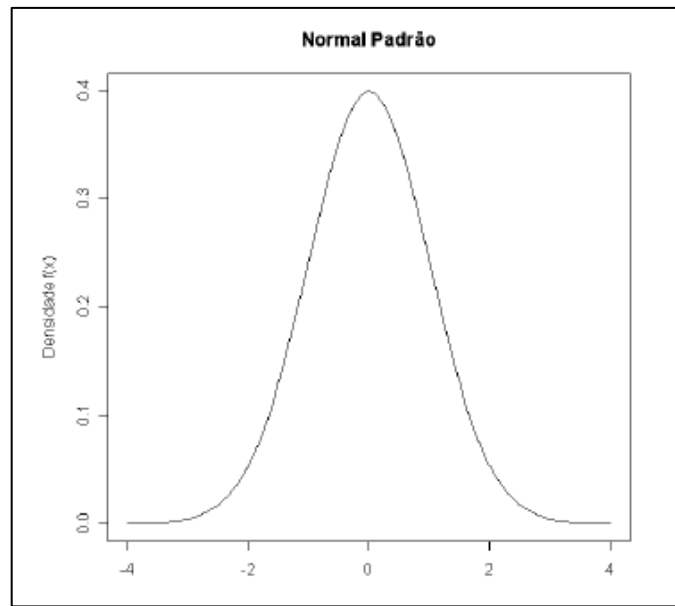
$$e = z. \frac{S_x}{n} \quad (9)$$

Para cada valor de μ e/ou σ tem-se uma curva de distribuição de probabilidade. Porém, para se calcular áreas específicas, faz-se uso de uma distribuição particular: a "distribuição normal padronizada", também chamada de *Standartizada* ou reduzida, o qual é a distribuição normal com $\mu=0$ e $\sigma=1$. Para obter tal distribuição, isto é, quando se tem uma variável X com distribuição normal com média μ diferente de 0 (zero) e/ou desvio padrão σ diferente de 1 (um), devemos reduzi-la a uma variável Z , efetuando o seguinte cálculo:

$$Z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (10)$$

Assim, a distribuição passa a ter média $\mu=0$ e desvio padrão $\sigma=1$. Pelo fato da distribuição ser simétrica em relação à média $\mu=0$, a área à direita é igual a área à esquerda de μ . Por ser uma distribuição muito usada, existem tabelas nas quais encontra-se a resolução de suas integrais. Assim, a tabela fornece áreas acima de valores não negativos que vão desde 0,00 até 4,09. A FIG. 10 abaixo apresenta o formato do gráfico da curva Normal padronizada.

Figura 10 – Curva Normal padronizada



Fonte: Portal Action (2014).

2.4.2 Distribuição t de Student

A distribuição t de Student é uma das distribuições mais utilizadas na estatística, com aplicações que vão desde a modelagem estatística até testes de hipóteses. É utilizada quando o tamanho da amostra é menor que 30 e o desvio padrão da população é desconhecido, utiliza-se neste caso o desvio padrão da amostra.

Definição: Uma variável aleatória contínua X tem distribuição t de Student com v graus de liberdade se sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{v+1}{2}\right)}{\sqrt{v\pi}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{v}\right)^{-\left(\frac{v+1}{2}\right)} \quad x \in (-\infty, \infty). \quad (11)$$

Utiliza-se a notação $X \sim t_v$.

2.4.2.1 Propriedades da distribuição t de Student

- A função densidade da distribuição t de Student tem a mesma forma em sino da distribuição Normal, mas reflete a maior variabilidade (com curvas mais alargadas) que é de se esperar em amostras pequenas.

- Os valores de t (valores correspondentes à área sob a curva nas caudas) são tabelados e dependem de dois fatores: graus de liberdade ($n - 1$) e grau de confiança desejado ($1 - \alpha$).
- Quanto maior o grau de liberdade, mais a distribuição t de Student se aproxima da distribuição Normal.

O intervalo de confiança é dado por:

$$\bar{x} - e \leq \mu \leq \bar{x} + e \quad (12)$$

Ou

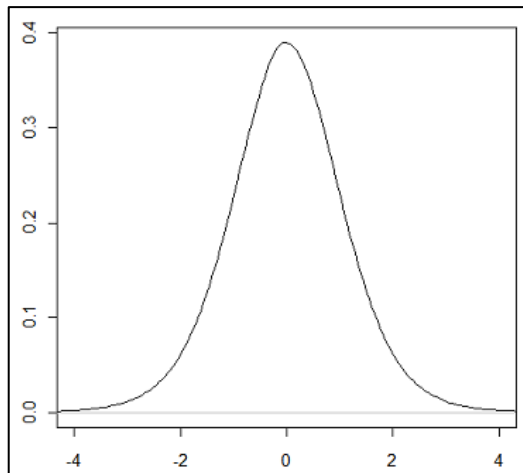
$$\mu = \bar{x} \pm e \quad (13)$$

Onde e representa o percentual de erro, calculado por:

$$e = t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

Abaixo a FIG. 11 ilustra o gráfico da função densidade de um t de Student com 10 graus de liberdade.

Figura 11 – Gráfico da função densidade de probabilidade de um t de Student com 10 graus de liberdade



Fonte: Portal Action (2014).

Considere $X_1, \dots, X_n$ variáveis aleatórias independentes e com distribuição normal com média μ e desvio padrão σ . Então, a variável

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (15)$$

onde s é o desvio padrão amostral, tem distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade. Este fato é decorrente do teorema a seguir.

Teorema: Considere Z e V duas variáveis aleatórias independentes tal que $Z \sim N(0,1)$ e $V \sim \chi_k^2$. Defina X como sendo uma variável aleatória de tal forma que

$$X = \frac{Z}{\sqrt{V/k}} \quad (16)$$

Tem-se que a variável aleatória X tem distribuição t de Student com k graus de liberdade.

2.4.2.2 Função geradora de momentos, Valor esperado e Variância

A função geradora de momentos da t de Student não está definida para todos os graus de liberdade, entretanto podemos encontrar os momentos da função t de Student para alguns graus de liberdade.

Desta forma seja $X \sim t_v$, então

$$\mathbb{E}(X^k) = \begin{cases} 0, & \text{se } 0 \leq k < v \text{ e } k \text{ é ímpar;} \\ \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \left[\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{v-k}{2}\right) v^{k/2} \right], & \text{se } 0 \leq k \leq v \text{ e } k \text{ é par;} \\ \text{indefinido,} & \text{se } k \geq v \text{ e } k \text{ é ímpar;} \\ \infty, & \text{se } k \geq v \text{ e } k \text{ é par.} \end{cases} \quad (17)$$

O valor esperado da t de Student é zero se $v > 1$ caso contrário não está definido. Basta observarmos que $\mathbb{E}(X) = \mathbb{E}(X^1)$, ou seja, utilizando a formula dos momentos temos que k é ímpar e assim, está definido apenas se $v > 1$; $k = 1$.

Utilizando a fórmula dos momentos da distribuição t de Student podemos calcular a variância de X .

$$\mathbb{E}(X^2) = \begin{cases} \frac{v}{v-2}, & \text{se } v > 2 \\ \infty, & \text{se } 0 < v \leq 2. \end{cases} \quad (18)$$

Entretanto para que variância esteja definida necessitamos que $v > 2$, caso contrário, $\mathbb{E}^2(X)$ não estará definida. Assim:

$$\text{Var}(X) = \begin{cases} \frac{v}{v-2}, & \text{se } v > 2 \\ \infty, & \text{se } 1 < v \leq 2 \end{cases} \quad (19)$$

2.5 PRINCÍPIOS DE FÍSICA

Nesta seção são apresentados alguns conceitos de física que explicam os fenômenos observados no escoamento, a saber, a força de empuxo ou Princípio de Arquimedes.

2.5.1 Empuxo

A FIG. 12a mostra o volume de água contido em um saco plástico fino submerso. A água no interior do saco está em equilíbrio estático. Portanto, seu peso deve ser equilibrado por uma força de mesma intensidade direcionada para cima. Esta força é igual à soma vetorial de todas as orças internas exercidas pelo fluido nas vizinhanças do saco. As setas mostradas nesta figura representam as forças exercidas sobre o volume de líquido como resultado da pressão do fluido que o circunda. Observa-se que as forças direcionadas para cima e atuantes na superfície inferior do saco são maiores que as forças direcionadas para baixo e atuantes em sua superfície superior, pois, a pressão aumenta com a profundidade. A força líquida direcionada para cima $\vec{F}_{\text{sus}}$ resultante desta diferença de pressão é chamada de *força de sustentação* ou *sustentabilidade* ou ainda de *força de empuxo* ou simplesmente *empuxo*.

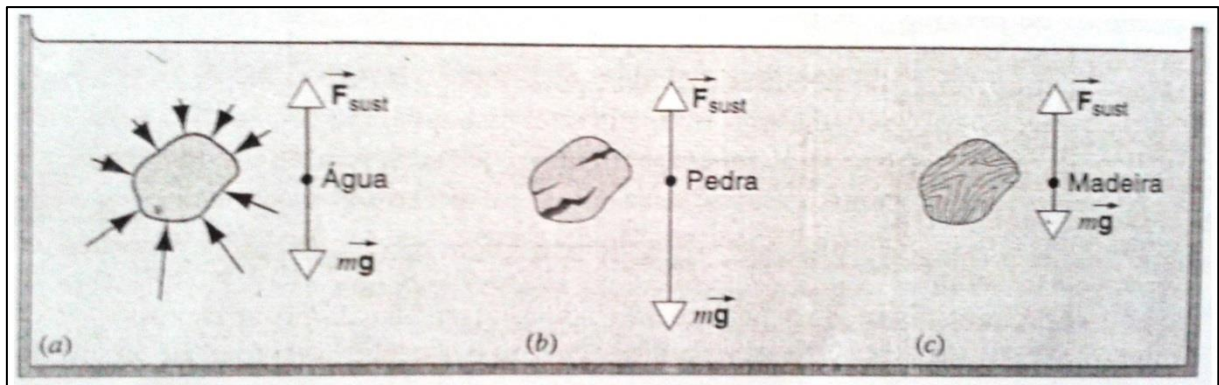
A pressão exercida sobre um objeto submerso pelo fluido em suas vizinhanças certamente não pode depender do material do qual o objeto é feito. Pode-se, portanto, substituir o saco com água por um pedaço de madeira com dimensões e forma idênticas, e a força de sustentação não será modificada. A força direcionada para cima será, ainda, igual ao peso do volume original de água. Esta constatação leva ao princípio de Arquimedes:

Um corpo total ou parcialmente imerso em um fluido é sustentado por uma força cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

Um objeto com massa específica maior que a da água (FIG. 12b) desloca um volume de água cujo peso é menor do que o peso do objeto. O objeto, portanto, afunda na água porque a intensidade da força de sustentação é menor do que o peso do objeto. Se o objeto submerso fosse apoiado em uma balança no fundo do reservatório de água, a balança indicaria uma força atuante para cima sobre o objeto, que seria igual à intensidade de $mg - \vec{F}_{\text{sus}}$; assim, os objetos submersos aparentam pesar menos do que eles realmente pesam [...].

Um objeto com massa específica menor do que a da água (FIG. 12c) sofre a ação de uma força direcionada para cima quando submerso, pois, o peso da água deslocada é maior do que o peso do objeto. Portanto, o objeto se eleva até atingir a superfície e continua a elevar-se até que a única parte ainda submersa possua o volume necessário para deslocar a água cujo peso seja igual ao peso total do objeto. Nesta circunstância, objeto flutuará em equilíbrio (Resnick, Halliday e Krane, 1960, p. 45).

Figura 12 – Força de empuxo atuando sobre corpos



Fonte: Resnick, Halliday e Krane (2004).

Serway e Jewett (2004) comparam estes dois casos: o empuxo que age em um corpo totalmente submerso e a força que age em um corpo flutuando.

Caso I: Um corpo totalmente submerso Quando um corpo é totalmente submerso em um fluido de densidade ρ_f , o valor do empuxo para cima é $B = \rho_f g V_0$, onde V_0 é o volume do corpo. Como o corpo está totalmente submerso, seu volume é o volume de fluido deslocado por ele tem o mesmo valor, $V = V_0$. Se o corpo tiver uma densidade ρ_0 , seu peso será $Mg = \rho_0 V_0 g$. Assim, a força resultante sobre ele é $\Sigma F = B - Mg = (\rho_f - \rho_0) V_0 g$. Se a densidade do corpo for menor do que a densidade do fluido, a força resultante é positiva e o corpo não suportado acelera para cima. Se a densidade do corpo for maior do que a densidade do fluido, a força resultante é negativa e o corpo não suportado afunda.

Caso II: Um corpo flutuando Considera-se um corpo em equilíbrio estático que flutua na superfície de um fluido, isto é, um corpo que esteja somente parcialmente submerso, como um cubo de gelo que flutua na água. Como ele está somente parcialmente submerso, o volume V do fluido deslocado pelo corpo é somente uma fração do volume total V_0 do corpo. O volume do fluido deslocado pelo corpo corresponde ao volume do corpo que se encontra abaixo da superfície do fluido. Como o corpo está em equilíbrio, o empuxo é equilibrado pela força gravitacional exercida no corpo. O empuxo tem um valor $B = \rho_f g V$. Como o peso do corpo é $Mg = \rho_0 V_0 g$ e como a segunda lei de Newton diz que $\Sigma F = 0$ no sentido vertical, $Mg - B$, pode-se ver que $\rho_f g V = \rho_0 V_0 g$ ou

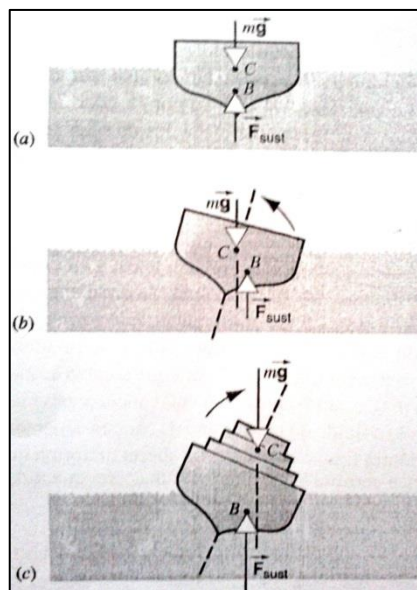
$$\frac{\rho_0}{\rho_f} = \frac{V}{V_0} \quad (20)$$

Assim, a fração do volume do corpo sobre a superfície do fluido é igual a razão entre a densidade do corpo e a densidade do fluido.

Neste trabalho aplica-se o disposto no caso I, pois sendo a bolha de ar o corpo submerso, mesmo ela tendo densidade maior que a da água (a 25 °C $\rho_{\text{água}} \approx 997,0479 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{\text{ar}} \approx 1,184 \text{ kg/m}^3$) sua tendência é subir, porque a pressão na parte inferior ocasionada pelas camadas de água é maior que a pressão na parte superior. Esta força de empuxo é muito maior que o peso do ar da bolha, portanto esta sobe. Pela fórmula: $\Sigma F = B - Mg = (\rho_f - \rho_o)V_0g$ e sabendo que para o cálculo do volume de uma esfera usa-se a fórmula $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ deduz-se que quanto maior for a bolha de ar, maior será seu raio e consequentemente o volume e a força de empuxo. Logo, teoricamente, quanto maior a bolha, maior a força de empuxo.

A força de sustentação pode ser considerada atuante no centro de gravidade do fluido deslocado pela parte submersa do objeto flutuante. Este ponto é conhecido como *centro de sustentação*. O peso atua no centro de gravidade do objeto como um todo. Esses dois pontos, em geral, não são coincidentes (FIG. 13a). Caso os dois pontos estejam sobre uma mesma reta vertical, o objeto poderá flutuar em equilíbrio, isto é, tanto a força resultante quanto o momento resultante serão nulos. Se o objeto flutuante for levemente perturbado em relação à sua posição de equilíbrio, a forma do fluido deslocado variará e o centro de sustentação sofrerá um leve deslocamento de sua posição em relação ao centro de gravidade do objeto flutuante. Nesta situação, o objeto flutuante estará sob a ação de um momento resultante orientado de forma a restabelecer sua posição de equilíbrio (FIG. 13b) ou poderá atuar no sentido inverso, fazendo com que o objeto tombe completamente (FIG. 13c) (Resnick, Halliday e Krane, 1960, p. 45).

Figura 13 – Seção transversal de um barco flutuante e força de empuxo sobre ele



Fonte: Resnick, Halliday e Krane (2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve detalhadamente o princípio de funcionamento da técnica eletrorresistiva essencial para o entendimento do trabalho, também descreve todos os materiais utilizados e sua respectiva função no sistema de medição. Aqui é dada ênfase ao principal elemento de detecção dos sinais: o sensor eletrorresistivo, que tem apresentado o passo-a-passo de sua construção e a determinação da distância entre as pontas do sensor duplo através do método de correlação de imagem digital e tratamento estatístico adequado. Também é apresentado o procedimento de medição adotado na coleta dos dados.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA TÉCNICA ELETORRESISTIVA

O princípio de funcionamento dos sensores eletroresistivos é baseado na diferença de condutividade elétrica entre duas fases distintas, como água e ar, por exemplo, conforme citado por BARBOSA e BRADBURY (1996) e BARBOSA (1997). Expondo o sensor eletrorresistivo a um escoamento bifásico composto de água e ar, onde a água possui concentrado acetato de sódio (CH_3COONa) dissolvido na proporção de 2,00 g/L, o sistema funciona como um circuito fechado permitindo a passagem de corrente; por outro lado, ao entrar em contato com a parte gasosa, o circuito é aberto, gerando um sinal que pode ser visualizado em um osciloscópio como uma onda. Após a passagem da fase gasosa o circuito volta a fechar. Ao serem utilizados sensores eletrorresistivos duplos, são captadas duas ondas: a primeira corresponde a passagem da fase gasosa pelo primeiro sensor, em seguida surge outra onda resultante da passagem da fase gasosa pelo segundo sensor. Com a distância entre as pontas dos sensores (d_s), o tempo de duração da onda (Δt) e a diferença entre as frentes de onda ($\Delta t'$) é possível calcular os parâmetros velocidade (V_s) e corda (l_s) da fase gasosa pelas equações:

$$V_s = \frac{d_s}{\Delta t} \quad (21)$$

$$l_s = V_s \Delta t' = \frac{d_s}{\Delta t} \Delta t' \quad (22)$$

A intrusividade do sensor no escoamento é um importante fator que deve ser considerado. HOFFER e RESNICK (1975) afirmam que o molhamento da ponta dos sensores retarda a detecção da fase gasosa e depende da tensão superficial do líquido. Procedimentos experimentais mostram que os sinais obtidos com a técnica apresentam erros devidos a esta intrusividade. Contudo, a análise de sinais, baseada nos padrões de reconhecimento lógico e

tratamento estatístico, tenta eliminar a incerteza associada à natureza estocástica inerente ao processo (JONES e ZUBER, 1975). Logo, todos os sinais devem ser tratados estatisticamente a fim de minimizar os erros ocorridos e os sensores calibrados para determinação de seus erros sistemáticos.

A calibração dos sensores precisa ser realizada em laboratório onde as condições podem ser mais bem controladas. Ela é feita pelo processo muito simples de inseri-lo e retirá-lo do escoamento em intervalos de tempo bem determinados para verificar a sensibilidade dos sensores quanto a identificação das fases. Os resultados são tratados estatisticamente.

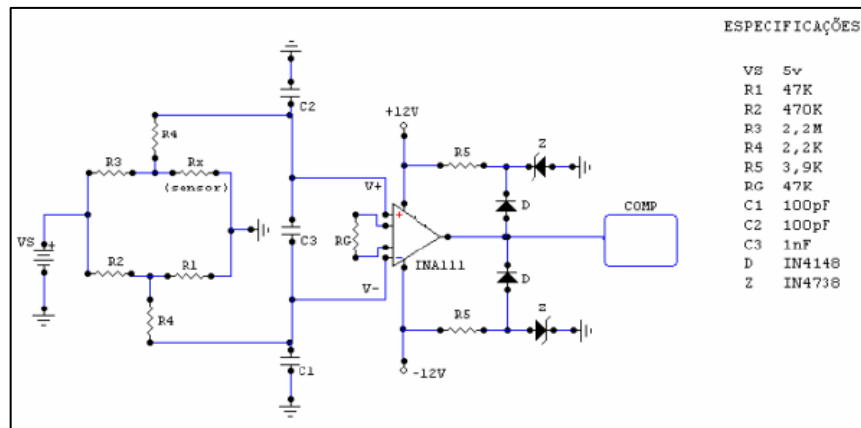
3.2 APARATO EXPERIMENTAL

Para a execução dos procedimentos de medição é necessário o uso combinado de diversos equipamentos, cada qual com uma função específica que interagindo captam, armazenam e tratam os sinais obtidos. O que torna específica a instrumentação dedicada à medição de variáveis em escoamentos bifásicos é a necessidade de se medir a ocorrência proporcional de cada uma das fases no escoamento e a natureza transiente intrínseca das variáveis significativas do escoamento. A ocorrência proporcional de cada uma das fases no escoamento é determinada através da medição da fração de vazio (ar). As características transientes das variáveis são medidas com o uso de instrumentos adequados e técnicas apropriadas de tratamento de sinal. A seguir é apresentado cada um dos elementos utilizados neste trabalho juntamente com suas características e finalidades.

Coluna de borbulhamento: a coluna de borbulhamento é o local onde ocorre o escoamento. Consiste de um tubo de vidro com 100 mm de altura e 15 mm de diâmetro interno apoiado em uma base de madeira. A extremidade inferior do tubo fica vedada e somente há passagem para a injeção de ar, a extremidade superior fica aberta e é por ela que os sensores são introduzidos no escoamento;

Circuito eletrônico: o circuito eletrônico utilizado foi desenvolvido por Rezende et al. (2008) exclusivamente para a aplicação nesta técnica. Tem por função ampliar o sinal captado para que este seja mais bem visualizado no osciloscópio, já que o sinal original possui baixa amplitude. Este elemento possui o sensor eletroresistivo conectado através de uma ponte de *Wheatstone*, e um amplificador de instrumentação, responsável em amplificar e condicionar o sinal para uma placa de aquisição. O esquema do circuito pode ser observado na FIG. 14;

Figura 14 – Circuito eletrônico



Fonte: Silva et al. (2007).

Filmadora: a filmadora tem por função permitir a análise da velocidade e corda das bolhas antes destas sofrerem o efeito intrusivo do sensor. Preferencialmente, deve ser uma filmadora de alta velocidade, mas neste trabalho foi utilizada uma câmera comercial da marca Sony. Para determinar a taxa de aquisição da câmera, um relógio digital foi utilizado através da filmagem de seu mostrador com o gerador de frequência operando a diferentes frequências; foram feitos 10 vídeos. Para o tratamento dos vídeos obtidos pela câmera filmadora foi utilizado o software *VirtualDubMod*, disponível gratuitamente na Internet. Os vídeos foram convertidos em arquivos de imagens (JPEG) usando recursos presentes no *software*, denominados filtros. Para o processamento e para melhorar a qualidade das imagens, foram utilizados os seguintes filtros: *Deinterlace* (desentrelaçador de imagens, que separa todas as imagens), *Grayscale* (que transforma a imagem para a escala de cinza, o que melhora o contraste), *Levels* (que ajusta brilho e contraste) e *Resize* (para redimensionamento das imagens). Pela análise das imagens assim obtidas, a taxa de aquisição da câmera foi determinada como sendo (30 ± 1) Hz.

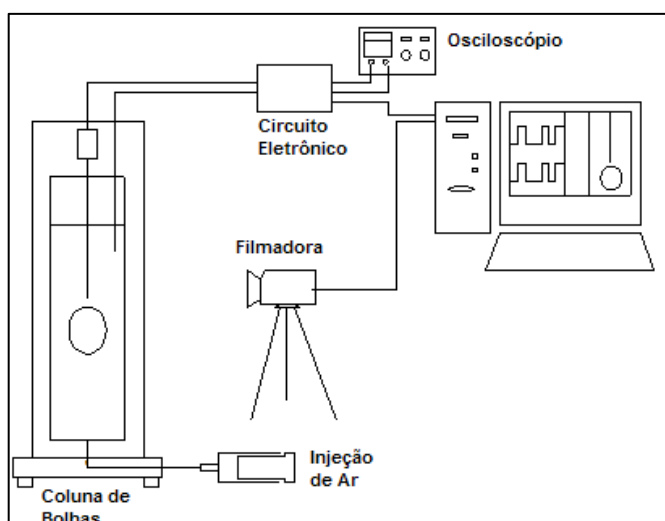
Osciloscópio: o osciloscópio é o aparelho que permite visualizar o fenômeno de condução e não-condução no sistema. Quando a bolha ascendente intercepta o sensor este entra em contato com o ar do interior da bolha, isto é, com o meio não-condutor e o circuito é aberto gerando na tela do osciloscópio uma onda que possui amplitude e tempo de duração. Por conseguinte, quando a bolha já passou pelo sensor o sistema volta a ser fechado, pois o sensor volta a entrar em contato com o meio condutor, a mistura de água e acetato de sódio. A importância deste equipamento é a de verificar se está ocorrendo corretamente estes dois estados de condução, caso contrário pode estar havendo fuga de corrente em algum ponto do sistema;

Injeção de ar: é responsável por injetar no sistema uma quantidade predeterminada de ar para formação das bolhas. Localiza-se na parte inferior da coluna de borbulhamento e consiste de uma seringa ligada à coluna através de um tubo de silicone. Neste trabalho a injeção de ar foi feita manualmente e de acordo com a escala de volume indicada no corpo da seringa;

Computador: o computador é utilizado para o armazenamento dos dados de medição e tratamento estatístico dos mesmos. É também utilizado para o tratamento das imagens obtidas com a filmadora e posterior comparação das duas técnicas.

A FIG. 15 mostra o esquema de montagem dos elementos descritos anteriormente.

Figura 15 – Esquema da instrumentação utilizada na medição de escoamentos multifásicos



Fonte: Silva et al. (2007).

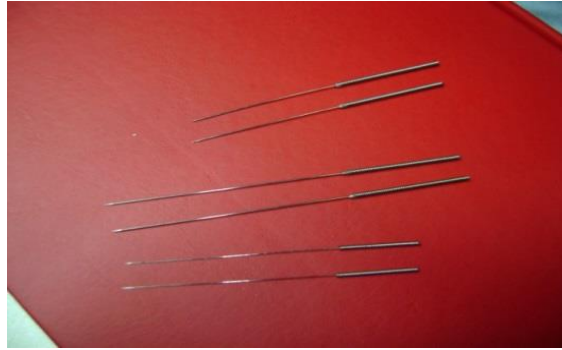
3.3 CONSTRUÇÃO DOS SENSORES

O elemento sensor utilizado na instrumentação de medição é o meio pelo qual os sinais serão captados e posteriormente transformados pelo circuito em uma forma mais usável. É composto basicamente por uma agulha de aço inox coberta com tinta isolante no qual apenas a ponta fica exposta; a outra extremidade fica ligada ao sistema através de um fio. Este tópico do trabalho descreve os procedimentos para a construção de um sensor eletrorresistivo e os cuidados que devem ser tomados durante sua construção a fim de garantir seu bom funcionamento.

A construção de um sensor com a finalidade de medição de um escoamento bifásico começa com a escolha da agulha. Após serem analisadas diversas agulhas disponíveis no mercado as de acupuntura se mostraram as mais adequadas devidas sua espessura e rigidez,

fatores a se considerar na interferência do sistema. O diâmetro ideal destas agulhas varia de 0,3 a 0,5 mm. A FIG. 16 mostra os vários tamanhos existentes de agulhas de acupuntura.

Figura 16 – Agulhas de acupuntura usadas na construção do sensor



Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Os materiais utilizados para o desenvolvimento dos sensores foram selecionados de acordo com as propriedades dos materiais, tais como isolamento elétrico, rigidez e dimensões.

Para construção do sensor são necessários:

- Agulha de acupuntura com diâmetro entre 0,3 e 0,5 mm;
- Cola de marca Super Bonder (isolante e rigidez);
- Estilete;
- Alicate de ponta fina;
- Fio condutor (0,5 mm de diâmetro);
- Clorofórmio (solvente para tinta isolante);
- Maçarico (reforça a conexão entre o fio condutor e a agulha);
- Luva de borracha (proteção individual);
- Resina Epóxi (isolante e reforço na rigidez do sensor);
- Tinta isolante (camada isolante impermeável).

O primeiro passo é segurar a agulha com o alicate apoiando-a em uma superfície horizontal e com o estilete fazer ranhuras em toda sua extensão. Estas ranhuras devem ser perpendiculares ao seu comprimento e tem por objetivo aumentar a aderência de materiais, como a tinta isolante que será aplicada, que deslizariam se a superfície estivesse lisa. Em seguida, deve-se retirar com o alicate a parte superior da agulha (parte mais grossa) e dependendo da espessura da agulha pode-se cortar um pouco mais para aumentar a rigidez. Após isto, utilizando o estilete, deve-se desencapar parte de um fio condutor e enrolar a parte desencapada na extremidade oposta à ponta da agulha. O comprimento do fio a ser cortado e

desencapado deve ser específico ao seu tipo de aplicação. Na FIG. 17 observa-se à esquerda as ranhuras sendo feitas na agulha com o estilete e à direita observa-se o fio condutor já desencapado sendo enrolado na extremidade da agulha.

Figura 17 – Ranhuras sendo feitas na agulha (esquerda) e fio desencapado sendo enrolado na agulha (direita)



Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Após envolver o fio na agulha, deve-se usar um alicate de ponta fina para apertar e fixar a parte do fio condutor que está enrolado na agulha. Em seguida, um pequeno maçarico é usado para soldá-los. Deve-se tomar cuidado para não queimar a parte do fio que continua encapada. O ponto de solda ocorre quando nota-se pequenas bolhas no metal do fio soldado.

Para o revestimento, usa-se uma mistura de tinta isolante e clorofórmio preparada em um tubo de ensaio. O revestimento tem por objetivo isolar o corpo da agulha de forma a deixar somente a ponta metálica exposta. O clorofórmio é usado para diluir a tinta e diminuir sua plasticidade, sendo possível revestir melhor o sensor. A proporção entre a tinta e o clorofórmio varia e deve ser feita de acordo com o estado da tinta: quanto mais viscosa, mais clorofórmio é necessário. O sensor é revestido mergulhando-o completamente na mistura. Esse procedimento deve ser realizado rapidamente, pois a volatilidade do clorofórmio faz com que a solução fique viscosa novamente após alguns segundos. Deve-se evitar que pedaços não diluídos de tinta fiquem no revestimento, retirando-os cuidadosamente do sensor antes que a solução seque. Na FIG. 18 é apresentado o clorofórmio à esquerda e a tinta isolante à direita utilizados no revestimento.

Figura 18 – Clorofórmio e tinta isolante usados no revestimento

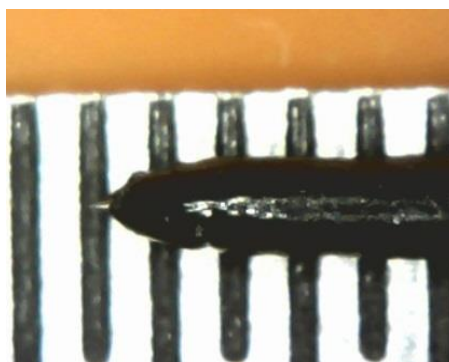


Fonte: elaborado pelo autor (2014).

O processo de revestimento deve ser repetido quantas vezes forem necessárias até que todo o sensor esteja coberto pela solução. Após secar a última camada de tinta, o sensor deve ser revestido com uma camada final de epóxi usando uma luva de borracha para espalhá-lo sobre todo o comprimento do sensor. Isso tem por finalidade melhorar o isolamento e torna-lo mais rígido. Por fim, deve-se deixar o sensor em repouso por 24 horas para secar.

A ponta do sensor deve ser lixada para gerar o contato. Para isso, deve-se usar uma lixa fina lixando suavemente de modo uniforme o contorno da ponta da agulha (coberta pelo revestimento) até expor a ponta metálica. A ponta metálica do sensor fica com tamanho médio em torno de 0,2 mm, conforme pode-se observar na FIG. 19.

Figura 19 – Sensor com a ponta exposta sobre escala de 0,5 mm



Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Para obtenção de um sensor duplo, utilizado neste trabalho, devem ser construídos dois sensores eletorresistivos conforme descrito anteriormente. Sequentemente, com o auxílio de uma régua estima-se uma distância de aproximadamente 2,5 mm entre suas pontas metálicas e cola-se um ao outro aplicando-se cola do tipo Super Bonder no espaço de contato entre eles.

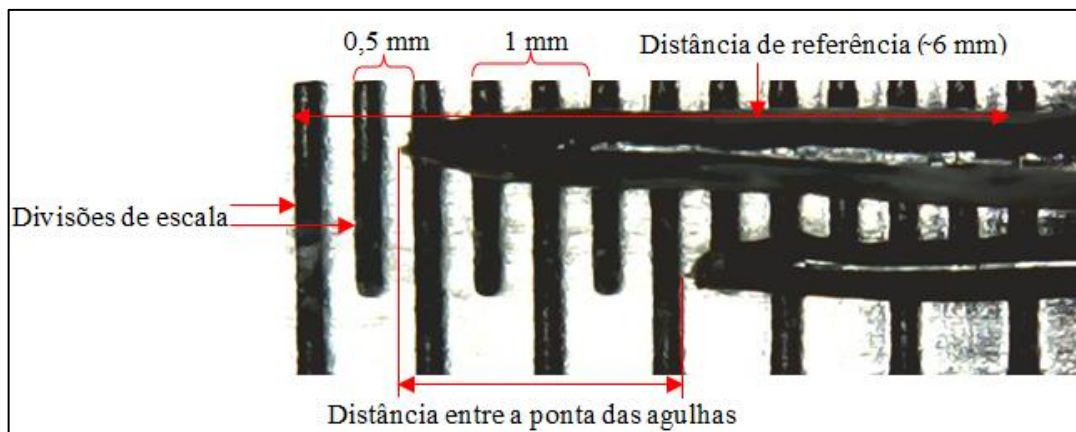
3.3.1 Determinação da distância entre as pontas do sensor duplo de condutividade

A distância entre as pontas do sensor duplo de condutividade é uma medida fundamental na determinação da velocidade da fração de vazio sob estudo, visto que representa a distância entre as frentes de onda captadas pelos instrumentos de medição. A determinação desta distância deve ser precisa e calculada dentro de elevados intervalos de confiança. Como esta distância é pequena (geralmente entre 1,5 a 3 mm) é impossível determiná-la com precisão a olho nu, por isso utilizou-se neste trabalho o método da correlação de imagens digitais já que o mesmo possibilita a análise a nível microscópico. Em seguida, fez-se o tratamento estatístico dos dados para obtenção do intervalo de incerteza desta distância.

O aparato experimental utilizado foi um microscópio, uma régua com menor medida de escala 0,5 mm e os softwares *Excel* e *Image J*.

Primeiramente, o microscópio foi conectado ao computador, onde as imagens foram visualizadas, e colocou-se o sensor longitudinalmente sobre a régua. Em seguida, a imagem do microscópio foi ajustada até se obter o melhor foco e várias fotos do sensor, em geral dez, foram tiradas; também buscou-se capturar o máximo possível de divisões de escala da régua. A consequência de tirar uma foto bem focalizada é que isso ocasiona um maior número de pixels e dessa forma a imagem se torna mais nítida e consequentemente obtêm-se um erro menor. É importante que cada foto seja tirada individualmente mudando-se a posição do sensor e o foco que deve estar sempre entre o sensor e a régua. Na FIG. 20 tem-se o sensor duplo sobre a régua e as distâncias consideradas na sua caracterização.

Figura 20 – Sensor duplo sobre régua de 0,5 mm



Fonte: elaborado pelo autor (2014).

O próximo passo consistiu em medir o número de pixels de cada foto. Tomando as fotos digitalizadas e armazenadas no computador utilizou-se o software *Image J* para medir os pixels das imagens. Nas fotos, ampliou-se a imagem na divisão de escala mais à esquerda da régua e foi definido um ponto na imagem no qual se estimou ser a separação dos contrastes (ZOI), simultaneamente se estimou o número de pixels equivalentes ao intervalo de incerteza do ponto escolhido chamado *Erro na Distância em Pixel (ErrPixRef)*. Este deve ser considerado, pois a imagem ampliada da foto não é nítida o suficiente para permitir a escolha de um ponto exato.

A partir daquele ponto mediu-se até a última divisão de escala da direita, também ampliando-se a imagem e definindo um ponto final de referência e o número de pixels do intervalo de incerteza daquele ponto. O comprimento da *Distância de Referência*, em milímetros, é fornecido no *Image J* em número de pixels. Este comprimento é a medida base (*NPixRef* – número de pixels de referência) para apurar com precisão a medida entre as pontas dos sensores.

Realizou-se a o mesmo procedimento para as pontas dos sensores: definiu-se o ponto onde se iniciará e terminará a medição e os pixels do intervalo de incerteza (*ErrPix* – erro na distância em pixel), tanto para o primeiro sensor quanto para o segundo. Estas medições foram realizadas para todas as imagens obtidas. Todos os dados coletados sobre comprimento (em milímetros) e número de pixels foram tabelados e tratados estatisticamente no programa *Excel*, conforme mostrado na TAB. 1. O tratamento adequado nas imagens obtidas permitiu obter a distância entre os sensores e sua respectiva incerteza. O método estatístico T-Student é usado para avaliação adequada da incerteza segundo a amostragem das imagens obtidas.

Tabela 1 – Representação da tabela utilizada para calcular com precisão a distância entre as pontas dos sensores

Distância entre os sensores									
Imagem	Sensor	DistRef [mm]	ErrRef	Npi	ErrPix	NPixRef	ErrPixRef	Distancia	Erro
1	SensorA	6	0,25	215.697	2	532.269	3	2,43	0,10
2	SensorA	6	0,25	218.975	2	534.076	3	2,46	0,10
3	SensorA	7	0,25	218.112	2	621.131	3	2,46	0,09
4	SensorA	7	0,25	224.201	2	621.999	3	2,52	0,09
5	SensorA	6	0,25	209.774	2	529.107	3	2,38	0,10
6	SensorA	6	0,25	214.956	2	528.009	3	2,44	0,10
7	SensorA	6	0,25	215.595	2	531.000	3	2,44	0,10
8	SensorA	6	0,25	219.227	2	532.010	3	2,47	0,10
9	SensorA	6	0,25	221.242	2	529.024	3	2,51	0,10
10	SensorA	6	0,25	220.117	2	529.175	3	2,50	0,10
Distância entre os sensores									
	média	desvpad	erro 95%	Intervalo de confiança		95%			
SenA	2,46	0,042	0,03	No. Pontos	No. Par.		Graus lib t		
				10	1		9		2,2622

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

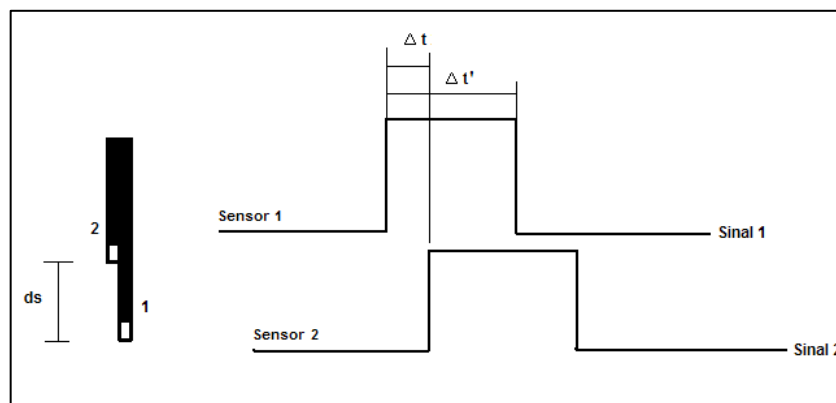
A TAB. 1 representa a tabela utilizada no tratamento estatístico. Através dela chegou-se a conclusão que o sensor analisado possuía $2,46 \pm 0,042$ mm de distância entre as pontas com um erro de 0,03% dentro de um intervalo de confiança de 95%.

3.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Para cada volume de bolha de ar escolhido (1, 2, 3, 4 e 5 ml), foram feitas dez réplicas. A cada medição feita o osciloscópio tinha a imagem parada no exato momento do deslocamento da bolha pelos sensores (o que gerava uma onda quadrada na tela) e o tempo de passagem da bolha foi estimado visualmente através da distância entre as duas frentes de onda com base na divisão de escala do osciloscópio observando-se a base de tempo configurada. Esses valores de tempo foram aplicados na equação 1 para o cálculo da velocidade das bolhas. Como todas as medidas têm erro conhecido, os erros em V_s são facilmente obtidos por propagação.

$$V_s = \frac{d_s}{\Delta t} \quad (20)$$

Figura 21 – Medidas para o cálculo da velocidade e corda de uma bolha



Fonte: Silva et al. (2007).

Para comparação com os resultados obtidos com a técnica dos sensores eletroresistivos, os vídeos feitos para cada uma das bolhas com a filmadora foram analisados e convertidos em imagens, o chamado “*Método da Correlação de Imagens Digitais*” mede a fração de vazio através da limiarização da imagem em tons de cinza. Os vídeos mostram a imagem de cada bolha antes e durante a sua passagem pelo sensor. As imagens mostram que as bolhas, tendem a ter uma ascensão estável, devido ao pequeno diâmetro da coluna, isto está

associado ao aumento do efeito de parede, chamadas de bolhas de Taylor. Entretanto, é possível perceber que a parte traseira das bolhas tem sempre característica oscilatória.

Para determinar os valores de velocidade através da filmadora, foi utilizado o *software VirtualDub* que permite obter a distância de passagem da bolha pelo sensor através da visualização quadro a quadro do vídeo. Atrás da coluna de borbulhamento foi fixada uma escala milimétrica, o que permitiu medir a distância de deslocamento da sua frente comparando as duas imagens antes que a bolha fosse interceptada pelo sensor. Para tanto, mediu-se a posição da frente da bolha em cada imagem em relação a uma mesma posição de referência. A distância de deslocamento é a diferença entre estas duas medidas. Como as imagens são geradas quadro a quadro e a frequência da filmadora foi avaliada, o intervalo de tempo entre estas imagens é conhecido.

A simples divisão da distância de deslocamento da frente da bolha pelo intervalo de tempo fornece a medida da velocidade da bolha através da técnica de análise de imagens, V_i . Como todas as medidas tem erro conhecido, o erro em V_i para cada bolha é facilmente obtido por propagação. Para todos os resultados experimentais da velocidade nesta técnica, o erro estatístico com um grau de 95% de confiança pode ser calculado com base nas 10 réplicas realizadas. Este erro incorpora os erros de reprodutibilidade na formação e ascensão das bolhas.

Durante a realização dos procedimentos de medição observou-se eventualmente que o sistema sofria interferências causadas pelo ambiente ou falhas na detecção da fase gasosa ocasionadas por fuga de corrente em virtude de mau isolamento dos sensores ou fios de condução. Contudo, este problema era solucionado investigando-se as causas e, por vezes, remontando o aparato.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados de ambas as técnicas são expostos separadamente. São calculados para cada uma a média, o desvio-padrão e o erro relativo com base em um intervalo de confiança de 95%. A distribuição de probabilidade adotada para o tratamento estatístico foi a distribuição t-student, pois a mesma é indicada para uma quantidade de dados menor ou igual a 30. Em seguida, é feita a comparação gráfica dos resultados e posteriormente uma breve discussão acerca dos resultados obtidos.

Para cada volume de bolha (1, 2, 3, 4 e 5 ml) foram realizadas dez medições para o cálculo da velocidade de ascensão das bolhas, tanto para a técnica eletrorresistiva quanto para o método da correlação de imagens digitais obtidas a partir da filmadora.

4.1 RESULTADOS DA TÉCNICA DOS SENSORES ELETORRESISTIVOS

Para técnica dos sensores eletroresistivos os resultados são apresentados na TAB. 2 abaixo:

Tabela 2 – Resultado da velocidade de ascensão das bolhas utilizando a técnica dos sensores eletrorresistivos

Volume	Tempo entre as frentes em cada arquivo (número de linhas)	Tempo (s) Frequência da placa (1/20000)	Velocidade (mm/s)
1 ml			
1.1	375	0,0188	131,200
1.2	292	0,0146	168,493
1.3	424	0,0212	116,038
1.4	343	0,0172	143,440
1.5	341	0,0171	144,282
1.6	323	0,0162	152,322
1.7	296	0,0148	166,216
1.8	444	0,0222	110,811
1.9	331	0,0166	148,640
1.10	385	0,0193	127,792
2 ml			
2.1	398	0,0199	123,618
2.2	0	0,0000	0
2.3	394	0,0197	124,873
2.4	257	0,0129	191,440
2.5	351	0,0176	140,171

2.6	366	0,0183	134,426
2.7	358	0,0179	137,430
2.8	385	0,0193	127,792
2.9	361	0,0181	136,288
2.10	380	0,0190	129,474
3 ml			
3.1	255	0,0128	192,941
3.2	275	0,0138	178,909
3.3	265	0,0133	185,660
3.4	286	0,0143	172,028
3.5	283	0,0142	173,852
3.6	262	0,0131	187,786
3.7	280	0,0140	175,714
3.8	246	0,0123	200,000
3.9	270	0,0135	182,222
3.10	259	0,0130	189,961
4 ml			
4.1	289	0,0145	170,242
4.2	266	0,0133	184,962
4.3	276	0,0138	178,261
4.4	261	0,0131	188,506
4.5	262	0,0131	187,786
4.6	269	0,0135	182,900
4.7	278	0,0139	176,978
4.8	286	0,0143	172,028
4.9	279	0,0140	176,344
4.10	273	0,0137	180,220
5 ml			
5.1	524	0,0262	93,893
5.2	558	0,0279	88,172
5.3	672	0,0336	73,214
5.4	543	0,0272	90,608
5.5	496	0,0248	99,194
5.6	0	0	0
5.7	512	0,0256	96,094
5.8	511	0,0256	96,282
5.9	573	0,0287	85,864
5.10	504	0,0252	97,619

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Na primeira coluna estão os volumes medidos e seus respectivos numeradores equivalentes. Na segunda coluna encontram-se o número de “quadros” registrados pela placa de aquisição durante a passagem da frente da bolha pelo primeiro sensor até este interceptar a

ponta do segundo sensor. A placa de aquisição capta 20000 “quadros” por segundo, assim para cada número de “quadros” apresentados na segunda coluna multiplica-se a razão $1/20000$, obtendo-se assim os resultados da terceira coluna que equivalem ao tempo (em segundos) de passagem da frente da bolha pelas pontas do sensor. Na quarta coluna tem-se as velocidades em mm/s, resultado da razão entre a distância das pontas do sensor $2,46 \pm 0,42$ mm e o tempo da terceira coluna. Os resultados 2.2 e 5.6 não puderam ser apresentados devido a erros que ocorreram na contabilidade dos “quadros” e foram descartados do tratamento estatístico. A TAB. 3 apresenta a média, o desvio-padrão e o erro calculado dentro de um intervalo de confiança de 95%. Na TAB. 4 encontram-se os dados estatísticos da distribuição t-Student utilizados.

Tabela 3 – Média, desvio-padrão e erro percentual das medidas de velocidade pela técnica dos sensores eletrorresistivos

Variáveis estatísticas			
	Média	Desvio-padrão	Erro 95%
Volume 1	140,92	19,436	13,90
Volume 2	138,39	20,710	15,62
Volume 3	183,91	9,022	6,45
Volume 4	179,82	6,236	4,46
Volume 5	91,22	8,090	6,10

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Tabela 4 – Intervalo de confiança e dados da distribuição *t-student* utilizados

Intervalo de confiança 95%			
No. Pontos	No. Par.	Graus lib.	T
10	1	9	2,262157

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

As tabelas 3 e 4 resumem os valores tratados estatisticamente para um intervalo de confiança de 95%. Nota-se que o desvio-padrão, e consequentemente o erro, é maior para bolhas de menor volume (1 e 2 ml) devido serem mais instáveis no formato durante sua ascensão. Já as bolhas de 3, 4 e 5 ml apresentam erros menores, pois as mesmas começam a caracterizar-se como bolhas de Taylor, onde o efeito parede e a maior área frontal da bolha acarretam certa resistência na sua ascensão e maior estabilidade do formato, contudo pela teoria a velocidade deveria aumentar com o aumento do tamanho da bolha o que não foi observado.

4.2 RESULTADOS DO MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL

Para o cálculo da velocidade através de filmagem, foram feitas dez medições para cada volume. Cada vídeo foi convertido em imagens pelo software *VirtualDub 1.5* e foram contabilizados os “quadros” que formam o vídeo, desde o instante em que a bolha aparece até o ponto em que ela começa interceptar o primeiro sensor. Para que fosse possível medir o deslocamento da mesma, uma escala milimétrica foi colocada ao lado da coluna de borbulhamento. Neste procedimento, o princípio do método de correlação de imagens digitais foi aplicado de uma forma superficial, sem considerar o nível microscópico das imagens, como ocorreu na caracterização do sensor duplo de condutividade. Na TAB. 5 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5 – Resultado da velocidade de ascensão das bolhas utilizando o método da correlação de imagem digital

Volume	Total de quadros	Tempo total (s)	Espaço percorrido (mm)	Velocidade (mm/s)
1 ml				
1.1	13	0,434	67	154,38
1.2	13	0,433	66	152,42
1.3	13	0,434	65	149,77
1.4	14	0,467	70	149,89
1.5	14	0,467	71	152,03
1.6	15	0,5	76	152,00
1.7	14	0,467	72	154,18
1.8	14	0,466	67	143,78
1.9	14	0,467	67	143,47
1.10	14	0,467	70	149,89
2 ml				
2.1	13	0,433	68	157,04
2.2	13	0,433	70	161,66
2.3	12	0,4	66	165,00
2.4	13	0,434	67	154,38
2.5	12	0,4	62	155,00
2.6	13	0,434	66	152,07
2.7	12	0,4	64	160,00
2.8	13	0,433	68	157,04
2.9	12	0,4	67	167,50
2.10	14	0,466	70	150,21
3 ml				
3.1	11	0,366	58	158,47
3.2	12	0,4	61	152,50

3.3	12	0,4	62	155,00
3.4	12	0,4	62	155,00
3.5	11	0,367	56	152,59
3.6	11	0,367	58	158,04
3.7	10	0,334	51	152,69
3.8	10	0,333	51	153,15
3.9	10	0,333	54	162,16
3.10	11	0,366	56	153,01
4 ml				
4.1	11	0,367	55	149,86
4.2	9	0,3	45	150,00
4.3	10	0,333	49	147,15
4.4	10	0,334	52	155,69
4.5	10	0,333	50	150,15
4.6	9	0,333	50	150,15
4.7	10	0,333	50	150,15
4.8	10	0,337	50	148,37
4.9	10	0,333	50	150,15
4.10	9	0,3	46	153,33
5 ml				
5.1	7	0,233	38	163,09
5.2	8	0,266	40	150,38
5.3	8	0,266	43	161,65
5.4	8	0,267	43	161,05
5.5	8	0,266	40	150,38
5.6	8	0,266	40	150,38
5.7	8	0,267	41	153,56
5.8	8	0,267	39	146,07
5.9	8	0,267	39	146,07
5.10	8	0,267	39	146,07

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Na primeira coluna da TAB. 5 encontram-se os volumes medidos e seus respectivos numeradores equivalentes. Na segunda coluna, tem-se o número de “quadros”, isto é, o número de imagens obtidas dos vídeos desde o instante em que a bolha aparece no vídeo até esta começar a tocar a ponta do primeiro sensor. Sabe-se que a câmera filmadora utilizada tem taxa de aquisição de 30 ± 1 Hz, ou seja, ela capta ± 30 imagens por segundo; logo, a terceira coluna apresenta este tempo obtido com base no número de quadros. Na quarta coluna tem-se o espaço de deslocamento da bolha obtido através da visualização da escala milimétrica e na quinta coluna a velocidade da bolha, em mm/s, resultado da razão do espaço percorrido (4^a

coluna) pelo tempo total (3ª coluna). A TAB. 6 abaixo apresenta a média, o desvio-padrão e o erro dentro de um intervalo de confiança de 95% para os dados da TAB. 5.

Tabela 6 – Média, desvio-padrão e erro percentual das medidas de velocidade pelo método da correlação de imagem digital

Variáveis estatísticas			
	Média	Desvio-padrão	Erro 95%
Volume 1	150,18	3,826	2,74
Volume 2	157,99	5,541	3,96
Volume 3	155,26	3,277	2,34
Volume 4	150,50	2,401	1,72
Volume 5	152,87	6,720	4,81

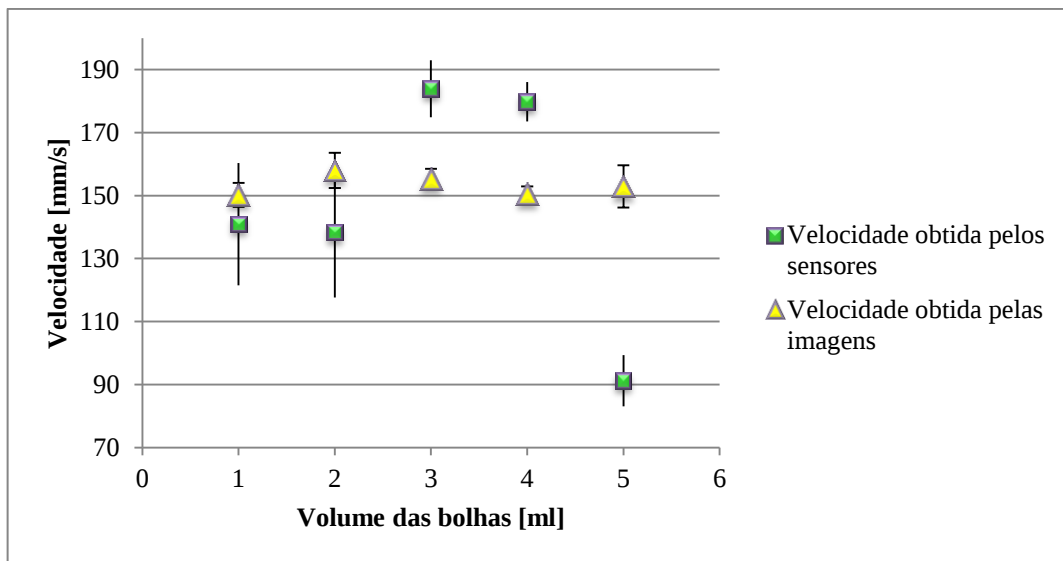
Fonte: elaborado pelo autor (2014).

A TAB. 6 acima apresenta as variáveis estatísticas média, desvio-padrão e erro aplicadas nos dados da TAB. 5. Aplica-se a este mesmo tratamento os dados apresentados na TAB. 4. Nota-se que a velocidade obtida por filmagem para todos os volumes é bastante similar para bolhas de 1 e 2 ml e apresenta erros menores que os obtidos pela técnica dos sensores duplos de condutividade. Este fato se deve pela medição ser feita antes da bolha interceptar o sensor e sofrer seus efeitos intrusivos.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos por ambas as técnicas para a velocidade e corda das bolhas são apresentados de forma resumida no GRAF. 1. Neste gráfico são apresentados os valores médios e seus erros a 95% de confiança para cada volume de bolhas.

Gráfico 1 – Medidas de velocidade das bolhas



Fonte: elaborado pelo autor (2014).

Os resultados indicam a existência de um erro sistemático nos valores das velocidades medidos pelas duas técnicas. As medidas de V_i obtidas para as bolhas de mesmo tamanho são iguais como se poderia esperar, pois o efeito de intrusão do sensor não afeta esta medida. Por outro lado, as medidas de V_s não são iguais. Estes resultados mostram claramente a existência do erro sistemático na medida de V_s e o fato do mesmo ter alguma dependência com as características do sensor.

A diferença de resultados de V_s em relação a V_i pode ser explicada pela tensão superficial que o primeiro sensor exerce na bolha antes dela interceptar o segundo sensor, causando-lhe uma deformação na parte dianteira e, conseqüentemente, atrasando a detecção da fase gasosa pelo segundo sensor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de sensores para medir velocidade e corda de bolhas foi avaliado por comparação com a técnica de análise de imagens obtidas por filmagem. A técnica de análise de imagens geraram valores com repetitividade adequada a despeito das variabilidades no processo de formação e ascensão de bolhas. Em contrapartida, a técnica do sensor duplo de condutividade apresentou resultados com alto grau de variabilidade e com margens de erro superiores ao da outra técnica. Pode-se concluir que o erro associado à intrusividade do sensor de condutividade existe e é grande, subestimando a velocidade em 4,46 -15,62%. Estes erros se mostraram maiores para as bolhas menores e decresceram com o tamanho da bolha de maior dimensão.

A diferença de resultados torna evidente o fato de que o sensor afeta a velocidade mensurada da bolha em ascensão. Isso se deve não somente à intrusividade, mas a todo o conjunto sensor, fio-condutor, circuito eletrônico os quais são suscetíveis a interferências ambientais. Tais interferências foram percebidas durante alguns procedimentos e podem ser causadas por: mau isolamento do fio-condutor, ligamentos internos do circuito mal conectados, picos de eletricidade causados pelo uso simultâneo de eletro eletrônicos na mesma rede, etc. Soma-se a isso as limitações de recursos que permitiram a coleta de apenas 10 dados para cada volume; contudo em condições que permitam a coleta e tratamento de um número muito maior de dados a precisão dos resultados aumentaria, seguindo uma distribuição normal. Apesar disso, o tratamento estatístico busca minimizar os erros inerentes ao processo. Além da coleta de um número maior de dados outra sugestão seria desenvolver uma fonte de tensão e ligá-la a um estabilizador a fim de evitar os picos de eletricidade da rede de energia convencional.

Assim, conclui-se que a técnica dos sensores duplos de condutividade quando utilizada em ambientes impróprios não apresenta resultados precisos em comparação à técnica de análise de imagens obtidas por filmagem, por apresentar sensibilidade de seus componentes à variações eletrostáticas e topológicas do meio.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria desenvolver não um sensor duplo, mas um sensor multiagulha colocado em diferentes pontos da coluna de borbulhamento para melhorar o mapeamento da velocidade de ascensão desde a parte inferior da coluna até o topo. Ou ainda, realizar o experimento com bolhas pequenas com raio entre 0,1 e 0,3 mm em um fluido viscoso, onde a parte superior da coluna conectada a uma bomba de vácuo reduziria a pressão a aproximadamente zero, de modo que a pressão no interior do fluido a uma altura x é devida

somente a altura da coluna de fluido $\rho g x$. Assim, a bolha de ar se expandiria isotermicamente a medida que subisse em uma trajetória retilínea. Aplicando-se a lei de Stokes ($F_r = 6\pi\eta r \cdot v$) e o princípio de Arquimedes ($E = \rho g \frac{4}{3}\pi r^3$) na segunda lei de Newton ($E - F_r = m a \approx 0$) e como o raio r da bolha seria função da profundidade x , a equação do movimento na forma diferencial seria $\frac{dx}{dt} + \frac{2}{9} \frac{\rho g}{\eta} \left(\frac{x_0}{x}\right)^{\frac{2}{3}} R^2 = 0$. Neste caso, considerar-se-ia todo o sistema como seguindo leis da física e assim seria mais fácil trabalhar no cálculo da velocidade de forma muito mais precisa, pois os conceitos relacionados aos fenômenos do escoamento em questão já teriam base experimental comprovada.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, J. R. J.; BRADBURY, L. J. S. **Estudo experimental em torno de pluma de bolhas**. In: ENCONTRO NACIONAL EM CIÊNCIAS TÉRMICAS, 6., 1996, Florianópolis: ENCIT, 1996. 1073-1078.

BARBOSA, J. R. J. **O método dos sensores eletro-resistivos aplicado a pluma de bolhas**. 1997. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

BENTES, H. P. H. **Cálculo de deformações através do método de correlação de imagens**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A.; PETERS W. H. (1985). **Application of digital-image correlation techniques to experimental mechanics**. Exp Mech 25:232–244 (September)

COSTA, E. C. F.; SASSIM, N. A.; FRANÇA, F. A. **Caracterização do escoamento intermitente vertical com sonda condutiva intrusiva**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas: PDPETRO, 2007.

GERAETS, J. J. E.; BORST, J. C. (1988). **A Capacitance Sensor for Two-phase Void fraction Measurement and Flow Pattern Identification**. Int. J. Multiphase Flow. V. 14. pp. 305-320.

JONES, O. C.; ZUBER, N. (1975). **The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow**. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp 273-306.

HARDY, J. E.; HYLTON, J. O. (1984). **Electrical Impedance String Probe for Two-phase Void and Velocity Measurements**. Int. J. Multiphase Flow. V. 10, pp. 861-873.

HOFFER, M. S.; RESNICK, W. (1975). **A Modified Electroresistivity Probe Technique for Steady and Unsteady-State Measurements in Fine Dispersions - I**. Chemical Engineering Science, Vol. 30, pp. 473-480.

IGUCHI, M.; NAKATANI, T.; KAWABATA, H. (1997). **Development of a multineedle electroresistivity probe for measuring bubble characteristics in molten metal baths.** Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 28, pp. 409-416 (June).

REZENDE, S. S. et al. **Desenvolvimento de um sistema de medição de fase utilizando sensores eletroresistivos.** In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL ENGINEERING AND SCIENCES. 12., 2008, Belo Horizonte: ENCIT, 2008.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. **Física 2.** 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

SILVA, M. O. et al. **Análise de técnica de sensores duplos de condutividade para a obtenção da velocidade e do tamanho de bolhas usando filmagem de alta velocidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 33., 2007, Aracaju: ENEMP, 2007.

SIQUEIRA, B. A. et al. **Análise de técnica de sensores duplos de condutividade para a obtenção da velocidade de bolhas usando filmagem.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 40., 2012, Belém: COBENGE, 2012.

MASSI, L. et al. **Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas.** Revista Química Nova na Escola, 2008, pp. 21.

KESKA, J. K.; WILLIAMS, B. E. (1999). **Experimental comparison of flow pattern detection techniques for air water mixture flow.** Experimental thermal and fluid science, Vol. 19, pp 1-12.

PACHECO, F. et al. **Identificação de padrões de escoamento multifásico e determinação da perda de carga com o auxílio de redes neurais.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas: PDPETRO, 2007.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F. (1982). **Digital imaging technique in experimental stress analysis.** Opt Eng 21:427–431 (May/June).

PETERS, W. H.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. (1983). **Applications of digital image correlation methods to rigid body mechanics.** Opt Eng 22:738–742 (June).

PORTAL ACTION. **Distribuição Normal.** Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/62-distribuição-normal>>. Acesso em: 24 abr. 2014.

PORTAL ACTION. **Distribuição t de Student.** Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/64-distribuição-t-de-student>>. Acesso em: 24 abr. 2014.

SERWAY, R. A.; JEWETT Jr, J. W. **Princípios de Física: movimento ondulatório e termodinâmica.** 3. Ed. Vol. 2. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

TAITEL, Y.; BARNEA, D.; DUKLER, A. E. (1980). **Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes.** AIChE Journal v. 26, n. 3, pp. 245-254.

THANG, N. T.; DAVIS, M. R. (1979). **The Estructure of Bubbly Flow Through Venturis,** Int. J. Multiphase Flow, v. 5 pp. 17-37.

ANÁLISE DE TÉCNICA DE SENSORES DUPLOS DE CONDUTIVIDADE PARA A OBTENÇÃO DA VELOCIDADE DE BOLHAS USANDO FILMAGEM

Bianca Araújo Siqueira – bianca.0511@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão
68440-000 – Abaetetuba - Pará

Jessica Lorrany Ferreira Barbosa – lorrany-barbosa@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão
68440-000 – Abaetetuba - Pará

Dayse Dias da Silva – daysedias18@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão
68440-000 – Abaetetuba - Pará

Rosimeire Gomes Almeida – almeidampr@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão
68440-000 – Abaetetuba – Pará

Marcelo de Oliveira e Silva – mos@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET
Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão
68440-000 – Abaetetuba - Pará

Resumo: O presente trabalho aborda o desenvolvimento de sensores duplos de condutividade e sua avaliação de desempenho na obtenção do parâmetro relevante nos processos de borbulhamento, a velocidade de ascensão das bolhas. Nesta primeira avaliação, foram executadas medidas para bolhas isoladas ascendendo em uma coluna de vidro vertical de pequeno diâmetro. A fase líquida foi uma solução aquosa bem diluída de acetato de sódio. Os sinais elétricos gerados pelo sensor são processados por um circuito eletrônico desenvolvido para soluções de baixa condutibilidade elétrica e adquiridos de forma analógica e, então, digitalizados. A avaliação das medidas de velocidade de cada bolha obtidas pelos sensores duplos de condutividade foi feita por meio da sua comparação com medidas obtidas a partir da análise de imagens obtidas por filmagem (30 Hz) da passagem da bolha pelo sensor. Neste caso, as medidas foram realizadas antes das bolhas sofrerem a presença do sensor, podendo ser consideradas como medidas não perturbadas de referência. O princípio de operação e o hardware das técnicas de medida são apresentados nesse trabalho. Ambas as técnicas se mostraram adequadas para medir os parâmetros em questão. Entretanto, foi observada a existência de erros sistemáticos (bias) nas medidas dos sensores de condutividade devido ao seu caráter intrusivo.

Palavras-chave: Sensores eletroresistivos, Escoamento bifásico, Análise de incertezas, erros de medição.

1. INTRODUÇÃO

Colunas de borbulhamento são amplamente empregadas nas indústrias química, petroquímica e farmacêutica, entre outras. O transporte de massa, energia e quantidade de movimento em um fluido bifásico dependem fortemente da distribuição de área interfacial, que, em um escoamento de bolhas, é determinada pelos valores locais de tamanho das bolhas e de retenção gasosa, a qual, por sua vez, depende da velocidade relativa média entre as fases. Dentre as diversas técnicas experimentais, a eletroresistiva de sensor duplo é uma das mais conhecidas e utilizadas para obter os parâmetros acima citados (Castillejos, 1987 e Zaho, 2005, Ishi e Wu, 1999 e Gupta et al., 2000).

O princípio de funcionamento deste sensor é baseado na diferença de condutibilidade elétrica entre as fases líquida e gasosa. A fase líquida apresenta caráter condutor e a fase gasosa tem caráter isolante. O sensor, dessa forma, consegue identificar dois estados diferentes, condução e não-condução, gerando um sinal similar ao de uma onda quadrada quando da passagem de uma bolha pelo mesmo. Quando processados e tratados, os sinais fornecem os valores de retenção gasosa, tamanho e velocidades das bolhas. A precisão das medidas é limitada pela taxa de aquisição da placa de aquisição de dados.

Entretanto, a intrusividade dos sensores de condutividade no escoamento é um importante fator que deve ser analisado. Por exemplo, Hoffer e Resnick (1975) comentam que o molhamento das pontas dos sensores, o qual retarda a detecção da fase gasosa e depende da tensão superficial, precisa ser considerado.

Evidências experimentais mostram que os sinais obtidos com a técnica de sensores eletroresistivos têm erros devido ao seu comportamento intrusivo. A análise dos sinais, baseados nos padrões de reconhecimento lógico e informações estatísticas, tenta eliminar a incerteza associada à natureza estocástica inerente ao processo de interceptação das bolhas pelo sensor (Jones e Zuber, 1975).

A literatura que trata do assunto apresenta algumas ponderações nos métodos de análise que merecem atenção, principalmente nos cálculos das velocidades das bolhas. Nesses procedimentos, são utilizados os sinais obtidos pelo sensor quando da passagem das partes dianteira e traseira das bolhas. Todos os resultados devem ser tratados estatisticamente a fim de minimizar os erros ocorridos (Bendat, 1966, Muñoz-Cobo, 2007, Barbosa, 1997).

Neste trabalho, medidas experimentais foram realizadas em bolhas isoladas usando sensores duplos de condutividade e análise de imagens obtidas por filmagem. Neste último caso, as medidas foram realizadas antes da bolha sofrer o efeito intrusivo do sensor de condutividade. Os erros experimentais foram avaliados e quantificados nas duas técnicas utilizadas. Os resultados experimentais obtidos pelas duas técnicas foram comparados.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O esquema do aparato experimental é apresentado na Figura 1. O ar foi injetado através de uma seringa na base de uma coluna de vidro vertical com 15 mm de diâmetro interno e 100 mm de altura. Na mesma altura do sensor foi posicionada uma câmera de vídeo da marca Sony SyberShot, que tem um modo de gravação de alta velocidade com a capacidade de gerar vídeos a uma taxa de aquisição em torno de 30 quadros por segundo por cerca de 10 segundos.

Para o tratamento dos vídeos obtidos pela câmera filmadora no modo de alta velocidade, foi utilizado o software *VirtualDubMod*, disponível gratuitamente na Internet. Os vídeos foram convertidos em arquivos de imagens (JPEG) usando recursos presentes no *software*, denominados filtros. Para o processamento e para melhorar a qualidade das imagens, foram utilizados os seguintes filtros: *Deinterlace* (desentrelaçador de imagens, que separa todas as

imagens), *Grayscale* (que transforma a imagem para a escala de cinza, o que melhora o contraste), *Levels* (que ajusta brilho e contraste) e *Resize* (para redimensionamento das imagens).

Um relógio digital foi utilizado para avaliar a frequência desta câmera comercial, através da filmagem de seu mostrador com o gerador de frequência operando a diferentes frequências. Pela análise das imagens assim obtidas, a taxa de aquisição da câmera foi determinada como sendo (30 ± 1) Hz.

Os sensores duplos de condutividade foram construídos a partir de agulhas de aço inox revestidas com tinta isolante, com exceção das pontas, as quais constituem as regiões ativas para a condução elétrica.

Para analisar o efeito das suas dimensões na sua intrusividade, foram construídos um sensor duplo de condutividade com dimensões específicas, conforme mostra a Figura 2. Suas características estão apresentadas na Tabela 1.

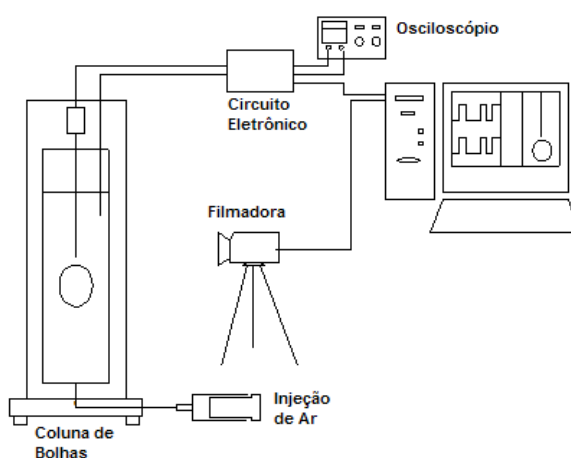


Figura 1: Aparato experimental

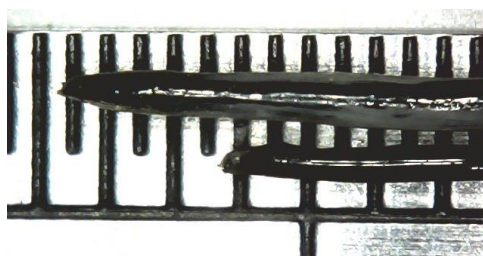


Figura 2: Sensores de diferentes dimensões.

O sistema de processamento dos sinais é constituído de um circuito eletrônico (Silva et al., 2007), com a capacidade de distinguir com bastante acurácia a fase gasosa da líquida. Em meios líquidos de baixa condutividade, o circuito é composto por um comparador e um amplificador de sinais, conforme apresentado na Figura 3.

Para a aquisição dos sinais analógicos foi utilizado um osciloscópio, e as imagens foram registrada e tratadas. Os sinais analógicos e digitais são mostrados na Figura 4.

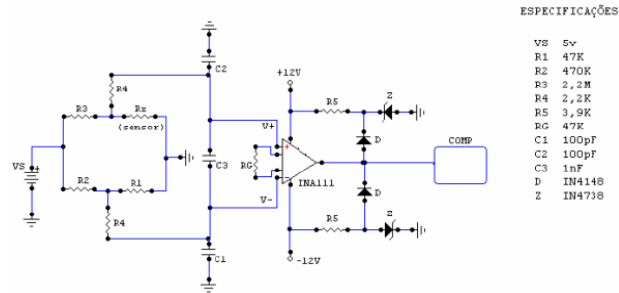


Figura 3: Circuito eletrônico.

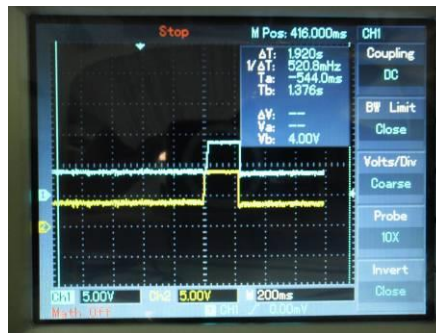


Figura 4: Bolhas Sinais Analógicos registrados devido à passagem da bolha pelo sensor duplo desenvolvido.

Estudos preliminares mostraram que a utilização dos sinais da passagem da parte traseira das bolhas não é recomendável, visto que as informações obtidas dos mesmos apresentaram erros elevados. Em alguns casos, o segundo sensor saía da bolha antes do primeiro sensor, levando ao cálculo de uma velocidade negativa para a bolha. Isto ocorre porque as bolhas empregadas são grandes (1 a 3 cm³ de volume), apresentando uma interface traseira com alto grau de oscilação. Além disso, o segundo sensor detecta uma bolha já bastante alterada pelo efeito de intrusão do primeiro sensor.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para cada volume de bolha de ar escolhido (0,5, 10, 15 e 20 ml), foram feitas dez réplicas para cada sensor.

Conforme comentado no sinal da seção anterior, a velocidade, V_s , e a corda, l_s , de cada bolha foram obtidas através do sensor duplo de condutividade de acordo com as medidas mostradas na Figura 5, onde d_s é a distância entre as pontas dos sensores. As equações (1) e (2) mostram os cálculos para a determinação de ambos. Como todas as medidas têm erro conhecido, os erros em V_s e l_s são facilmente obtidos por propagação.

$$V_s = \frac{d_s}{\Delta t} \quad (1)$$

$$l_s = V_s \Delta t' = \frac{d_s}{\Delta t} \Delta t' \quad (2)$$

Para comparação com os resultados obtidos pelos sensores eletroresistivos, os vídeos feitos para cada uma das bolhas com a câmera no modo de alta velocidade foram analisados e convertidos em imagens. Os filmes mostram o comportamento de cada bolha antes e durante a sua passagem pelo sensor.

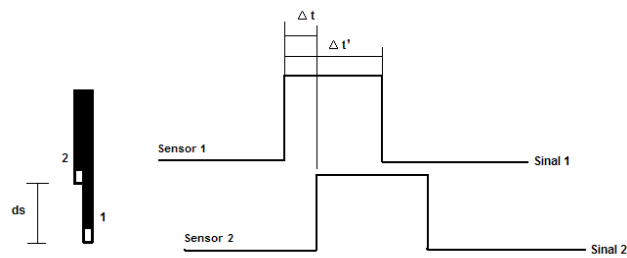


Figura 5: Medidas para o cálculo da velocidade e da corda de uma bolha.

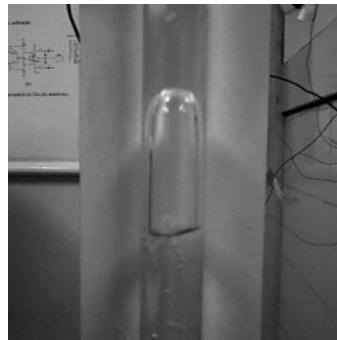


Figura 6: Bolhas de 10 ml.

As imagens mostram que as bolhas tendem a ter uma ascensão estável, devido ao pequeno diâmetro da coluna, isto está associado ao aumento do efeito de parede, chamadas de bolhas de Taylor. Entretanto, é possível perceber que a frente traseira das bolhas tem sempre a característica oscilatória.

Para determinação dos valores de velocidade das bolhas das imagens foi utilizado um outro *software* denominado *ImageProPlus*. Este permite a medida de distâncias nas imagens. Como uma calibração usando uma distância de referência sobre um escala milimetrada, é possível obter distâncias das imagens com um bom nível grau de acurácia, conforme mostra a Figura 7. Esta figura mostra como foram feitas as medidas necessárias à determinação da velocidade de ascensão da bolha.



Figura 7: Análise de imagens.

Para calcular a velocidade da bolha, foi medida a distância de deslocamento da sua frente entre duas imagens, ambas antes que a bolha fosse interceptada pelo sensor. Para tanto, mediu-se a posição da frente da bolha em cada imagem em relação a uma mesma posição de referência. A distância de deslocamento é a diferença entre estas duas medidas. Como as imagens são geradas quadro a quadro e a frequência da câmera foi avaliada, o intervalo de tempo entre estas imagens é conhecido. A simples divisão da distância de deslocamento da frente da bolha pelo intervalo de tempo fornece a medida da velocidade da bolha através da técnica de análise de imagens, V_i . Como todas as medidas têm erro conhecido, o erro em V_i para cada bolha é facilmente obtidos por propagação. Para todos os resultados experimentais da velocidade nesta técnica, o erro estatístico com um grau de 95% de confiança pode ser calculado com base nas 10 réplicas realizadas. Este erro incorpora os erros de reprodutibilidade na formação e ascensão das bolhas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos por ambas as técnicas para a velocidade e corda das bolhas são apresentados de forma resumida na Figuras 10. Nesta figura são representados os valores médios e seus erros a 95% de confiança para a 10 bolhas de cada volume.

Os resultados mostrados na Figura 8 indicam a existência de um erro sistemático nos valores das velocidades medidos pelas duas técnicas. As medidas de V_i obtidas para as bolhas de mesmo tamanho, mas ensaiadas para diferentes sensores, são coincidentes, como se poderia esperar, pois o efeito de intrusão do sensor não afeta esta medida. Por outro lado, as medidas de V_s não são iguais para os dois sensores, exceto para as menores bolhas, onde os intervalos de erro se interceptam. Estes resultados mostram claramente a existência do erro sistemático na medida de V_s e o fato do mesmo ter alguma dependência com as características do sensor.

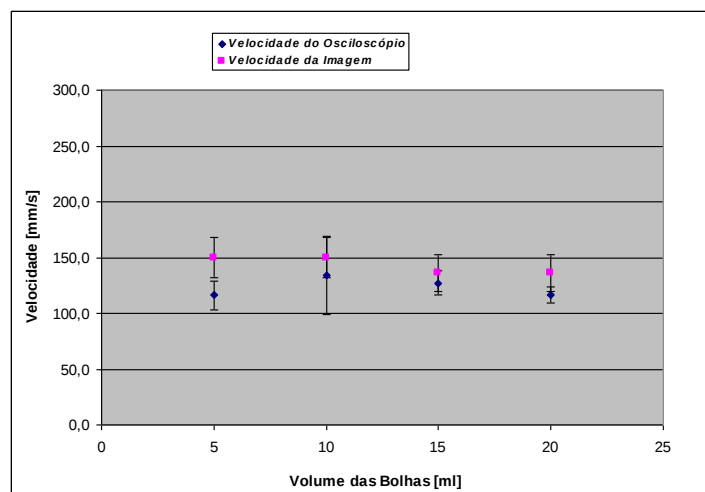


Figura 8: Medidas de velocidade das bolhas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de sensores de condutividade para medir velocidade e corda de bolhas foi avaliada por comparação com análise de imagens obtidas por filmagem de alta velocidade. Ambas as

técnicas geraram valores com repetibilidade adequada a despeito das variabilidades no processo de formação e ascensão de bolhas.

Pode-se concluir que o erro associado à intrusividade do sensor de condutividade existe e é grande, subestimando a velocidade em 6- 22%. Estes erros se mostraram decrescentes com o tamanho da bolha para o sensor de menor dimensão mas apresentaram-se constantes na margem de erro.

Como os erros sistemáticos na velocidade e na corda da bolha não são iguais, o período de tempo que o sensor sente a presença da fase gasosa é submestimado. Assim, não se deve utilizar medidas obtidas pelos sensores de condutividade sem calibração.

Agradecimento

Os autores agradecem o financiamento da PROPES/UFPA para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

COSTA, E. C. F.; SASSIM, N. A.; FRANÇA, F. A. *Caracterização do escoamento intermitente vertical com sonda condutiva intrusiva*. 4º PDPETRO, Campinas, SP, out. 2007. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_2_3_0290-1.pdf>. Acesso em: 10 de set. de 2011.

RIBEIRO, Marco Antônio. *Metrologia industrial: fundamentos da confirmação metrológica*. 6ª Ed. Salvador, 2004.

SILVA, M. O. et al. *Análise de técnica de sensores duplos de condutividade para a obtenção da velocidade e do tamanho de bolhas usando filmagem de alta velocidade*. XXXIII Congresso brasileiro de sistemas particulados—ENEMP. Aracaju: 2007.

BARBOSA, J. R. (1997), “O método dos senores eletro-resistivos aplicado à pluma de bolhas”. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 112p.

BENDAT, J. S. e PIERSON, A. G. (1966), “Measurements and Analysis of Random Data”, John Wiley & Sons Inc., New York.

CASTILLEJOS, A. H. e BRIMACOMBE, J. K. (1987), “Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid Plumes: Part I. An Improved Electroresistivity Probe Technique”. Metallurgical Transactions B, Vol. 18bB, pp 649.

HOFFER, M. S. e RESNICK, W. (1975), “A Modified Electroresistivity Probe Technique for Steady and Unsteady-State Measurements in Fine Dispersions - I”. Chemical Engineering Science, Vol. 30, pp 473-480.

GUPTA, P., MUTHANNA, H. A., MILORAD, P. D., PATRICK, L.M. (2000), “A novel signal filtering methodology for obtaining liquid phase tracer responses from conductivity probes”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol 11, p.123-131.

ISHII, M. e WU, Q. (1999), “Sensitivity study on double-sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow”. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 25, pp 155-173.

JONES, O. C. e ZUBER, N. (1975), “The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow”. Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp 273-306.

MUÑOZ-COBO, J. L. et Al. (2007), “Monte-Carlo calculation of the calibration factors for the interfacial area concentration and the velocity of the bubbles for double sensor conductivity probe”. Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, pp 484-496.

ZAHO, D. et Al. (2005), “An experimental study on local interfacial area concentration using a double-sensor probe”. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp 1926-1935.

INSTRUCTIONS FOR THE PREPARATION AND SUBMISSION OF PAPERS TO BE PUBLISHED IN THE PROCEEDINGS OF THE XL BRAZILIAN CONGRESS ON ENGINEERING EDUCATION

Abstract: *This paper discusses the development of dual sensors of conductivity and its performance evaluation in obtaining the relevant parameter in the process of bubble, the rise velocity of bubbles. In this first evaluation, measurements were performed for isolated bubbles rising in a glass column of small diameter vertical. The liquid phase was a very diluted aqueous solution of sodium acetate. The electrical signals generated by the sensor are processed by an electronic circuit developed for solutions of low electrical conductivity and acquired in analog and then digitized. The assessment of the speed of each bubble obtained by dual sensors conductivity was made by comparison with measurements obtained from the analysis of images obtained by recording (30 Hz) of the passage by the bubble sensor. In this case, measurements were made before the bubbles suffer the presence of the sensor, measures may be considered as undisturbed reference. The principle of operation of hardware and measurement techniques are presented in this work. Both techniques are suitable for measuring the parameters in question. However, we observed the existence of systematic error (bias) in the measurements of conductivity sensors because of its intrusive character.*

Key-words: *Sensors eletroresistivos, Two phase flow, uncertainty analysis, measurement errors.*

**ANEXO B – Artigo sobre construção dos sensores, o qual originou o TCC,
publicado no XL Cobenge**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES DE CONDUTIVIDADE PARA
MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS**

Bianca Araújo Siqueira – bianca.0511@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET

Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão

68440-000 – Abaetetuba - Pará

Jessica Lorrany Ferreira Barbosa – lorrany-barbosa@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET

Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão

68440-000 – Abaetetuba - Pará

Dayse Dias da Silva – daysedias18@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET

Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão

68440-000 – Abaetetuba - Pará

Rosimeire Gomes Almeida – almeidampr@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET

Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão

68440-000 – Abaetetuba – Pará

Marcelo de Oliveira e Silva – mos@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET

Rua Manoel de Abreu s/n, Mutirão

68440-000 – Abaetetuba - Pará

Resumo: Este artigo apresenta as etapas da construção de um sensor de condutividade para medição de escoamentos bifásicos onde ocorre ascensão de bolhas. Na construção, agulhas de acupuntura são usadas para ser o corpo do sensor devido a características físicas de rigidez e resistência a corrosão. Ao longo de toda extensão da agulha faz-se ranhuras para melhorar a aderência e defini-se qual será o tamanho do sensor. Um fio condutor parcialmente desencapado é enrolado e soldado com maçarico. O revestimento, mistura de tinta isolante e clorofórmio, isola a parte metálica e a ponta que fica exposta capta os sinais emitidos do meio condutor/isolante. Este procedimento tem como objetivo construir um sensor através do qual pode-se obter dados experimentais em colunas de borbulhamento, processos de flotação, minerodutos etc. Para isso, é importante realizar cuidadosamente cada passo da construção afim de garantir um sensor que forneça resultados satisfatórios com a mínima intrusividade no sistema e a caracterização do sensor é adequadamente avaliada quanto a sua incerteza dimensional.

Palavras-chave: Sensores eletroresistivos, Escoamento bifásico, Análise de incertezas, erros de medição.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento bifásico vertical é típico em indústrias químicas, petroquímicas e de produção de petróleo, e pode ocorrer nos circuitos de refrigeração de reatores nucleares (COSTA, 2007). A instrumentação para fazer estas medições é vital para a indústria. Os instrumentos tem produzido uma grande economia de tempo e mão de obra envolvida. Os sistemas de instrumentos agem como extensões dos sentidos humanos e facilitam o armazenamento da informação de situações complexas. O elemento sensor não é um instrumento, mas faz parte integrante da maioria absoluta dos instrumentos. O elemento sensor ou elemento transdutor é o componente do instrumento que converte a variável física de entrada para outra forma mais usável (RIBEIRO, 2004).

Uma das instrumentações utilizadas para a medição de escoamentos multifásicos é composta do sensor, de uma coluna de borbulhamento, um circuito eletrônico, um osciloscópio, placa de aquisição, uma câmera de vídeo que tenha um modo de gravação de alta velocidade, uma injeção de ar e um computador, todos estes elementos devem estar interconectados conforme mostra a figura 1.

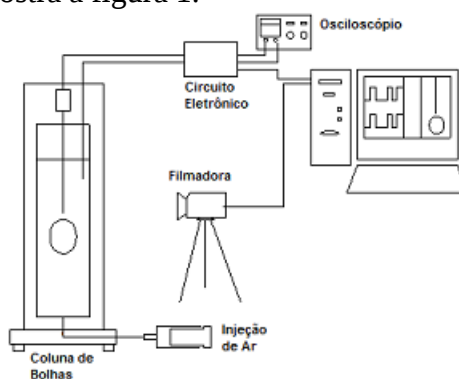


Figura 1—Instrumentação utilizada na medição de escoamentos multifásicos (Silva et al, 2007).

Água destilada desionizada misturada com 2 g/L de acetato de sódio é colocada na coluna de borbulhamento e com a injeção de ar formam-se bolhas de volumes pré-definidos caracterizando assim uma mistura bifásica composta de água e ar. O sensor fica inserido na parte superior, no centro do diâmetro da coluna. A bolha de ar ao subir tem a parte dianteira em contato com o sensor que capta a passagem para o meio isolante, ou seja, o ar; imediatamente o sensor que está ligado ao circuito, à placa de aquisição e ao computador emite um sinal representado por um pulso aberto que é visualizado no osciloscópio. Ao passar pela parte traseira da bolha, o sensor volta a entrar em contato com o meio condutor e o pulso é fechado. Os pulsos gerados ficam armazenados no computador e através deles é possível calcular a velocidade e a corda das bolhas. A câmera de vídeo é utilizada com o mesmo objetivo: a imagem dos quadros registra a passagem das bolhas pelo sensor e por estas imagens pode-se fazer um tratamento para determinar a velocidade e a corda das bolhas.

Aqui procurou-se construir um sensor de baixo custo feito artesanalmente. Exposto sua utilização, a seguir são descritos os passos na construção deste elemento.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A construção do sensor proposto e os detalhes de construção serão descritos e a caracterização do mesmo será apresentada. Através de análise de imagens, o sensor é dimensionado.

2.1. Construção do sensor de condutividade

A construção de um sensor com a finalidade de medição de um escoamento bifásico (água e ar no caso) começa com a escolha de uma agulha que será o canal de emissão de sinais. Após analisar o formato e espessura de diversas agulhas disponíveis no mercado, as agulhas específicas para acupuntura se mostraram as mais adequadas para a construção do sensor. O diâmetro ideal destas agulhas varia entre 0,5 e 0,3 mm devido a questões de rigidez e interferência destas sobre o escoamento (Fig. 2).



Figura 2—Agulhas de acupuntura usadas na construção do sensor.

Os materiais utilizados para o desenvolvimento dos sensores foram selecionados de acordo com propriedades dos materiais, quanto ao isolamento elétrico, rigidez e dimensões. Para a construção do sensor são necessários os seguintes materiais:

- Agulha de acupuntura com diâmetro entre 0,3 e 0,5 mm;
- Cola de marca Super Bonder (isolante e rigidez);
- Estilete;
- Alicate de ponta fina;
- Fio condutor (0,5mm de diâmetro);
- Clorofórmio (solvente para tinta isolante);
- Maçarico (reforça a conexão entre o fio condutor e a agulha);
- Luva de borracha (proteção individual);
- Resina Epóxi (isolante e reforço na rigidez do sensor);
- Tinta isolante (camada isolante impermeável).

2.2. Preparação da agulha

De posse da agulha é necessário fazer em toda sua superfície ranhuras com um estilete para melhorar a aderência a outros materiais, pois posteriormente lhe será aplicadas camadas de tinta isolante que poderiam deslizar se a superfície estivesse lisa. Segura-se uma de suas extremidades com um alicate e faz-se as ranhuras perpendiculares ao seu comprimento usando o estilete (Fig. 3). Após essa etapa, a parte superior da agulha (a parte mais grossa) é retirada usando o alicate. Dependendo da espessura da agulha, pode-se cortar um pouco mais embaixo (da parte mais grossa) para aumentar sua rigidez. Em seguida, deve-se desencapar parte de um fio condutor usando o estilete e enrolar a parte desencapada na parte superior da agulha de modo a manter o contato com o sensor. Note que o comprimento do fio condutor a ser cortado e desencapado deve ser específico ao seu tipo de aplicação (Fig. 4).



Fig. 3—Ranhuras sendo feitas na agulha.



Figura 4—Fio desencapado sendo enrolado na agulha.

Após envolver o fio na agulha, deve-se usar um alicate de ponta fina para apertar e fixar o fio condutor enrolado na agulha. Em seguida, usando uma luva de borracha deve-se aplicar “a mão” uma camada de cola do tipo Super Bonder sobre a região onde o fio está enrolado na agulha. Para fixar e prender o fio condutor e a agulha, um pequeno maçarico é usado para soldá-los. Deve-se tomar cuidado para não queimar a parte do fio que continua encapada. O ponto de solda ocorre quando é possível notar pequenas bolhas no metal do fio soldado.

2.3. Revestimento do sensor

Para o revestimento, usa-se uma mistura de tinta isolante e clorofórmio preparada em um tubo de ensaio. O revestimento tem por objetivo isolar o corpo da agulha de forma a deixar só a ponta metálica captando os sinais. O clorofórmio é usado para diluir a tinta e diminuir sua plasticidade, sendo possível revestir melhor o sensor. A proporção entre a tinta e o clorofórmio varia e deve ser feita de acordo com o estado da tinta: quanto mais viscosa mais clorofórmio é necessário. O sensor é revestido completamente, mergulhando-o na mistura. Esse procedimento deve ser realizado rapidamente, pois a volatilidade do clorofórmio faz com que a solução fique viscosa novamente após alguns segundos. Deve-se evitar que pedaços não diluídos de tinta fiquem no revestimento, retirando-os cuidadosamente do sensor antes que a solução seque.

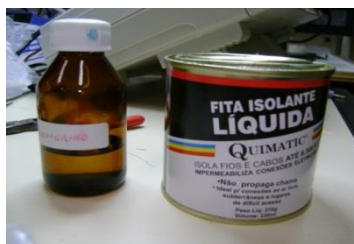


Figura 4—Clorofórmio e tinta isolante usados no revestimento.

Após secar a solução aplicada no sensor, o processo de revestimento deve ser repetido quantas vezes forem necessárias até que todo o sensor esteja coberto pela solução. Após secar a última camada de tinta, o sensor deve ser revestido por uma camada final de epóxi (ideal que seja o de secamento rápido) usando a luva de borracha para espalhá-lo sobre todo o comprimento do sensor. Isso tem por finalidade melhorar o isolamento e torná-lo mais rígido. Por fim, deve-se deixar o sensor em repouso por 24 horas para secar.

A ponta do sensor deve ser lixada para gerar o contato. Para tal, deve-se usar uma lixa fina, lixando suavemente até expor a ponta metálica da agulha. O ideal é remover de modo uniforme no contorno da ponta da agulha. A ponta do sensor fica com o tamanho médio exposto em torno de 0,2 mm.

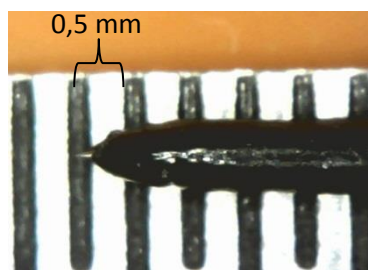


Figura 5—Sensor com a ponta exposta.

3. RESULTADOS

Os sensores desenvolvidos são avaliados em uma coluna de vidro vertical, onde volumes específicos de ar são injetados na base da mesma, conforme as imagens da Figura 7. A distancia entre as pontas do sensor duplo desenvolvido foi determinada através de análise estatística de imagens de alta resolução. O tratamento adequado nas imagens obtidas permite obter a distancia entre os sensores e sua respectiva incerteza. O método estatístico T-Student é usado para avaliação adequada da incerteza segundo a amostragem das imagens obtidas.

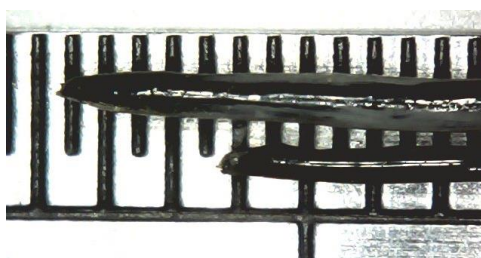


Figura 6: Sensor duplo desenvolvido, com distancia entre as pontes de $2,46 \pm 0,03 \text{ mm}$.

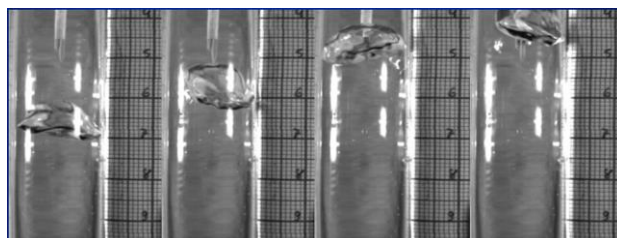


Figura 7: Bolhas de 0,5 ml atravessam o sensor na coluna de vidro vertical.

Bolhas geradas atravessam um sensor duplo, cuja passagem é registrada em osciloscópio. A passagem da bolha interrompe a corrente elétrica e pulsos são gerados através do sinal analógico captado. Os resultados da Figura 8, mostram que o sensor desenvolvido consegue representar de maneira adequada a passagem da bolha pelo sensor. Um tratamento mais apurado é feito para garantir a eficiência do sensor desenvolvido.

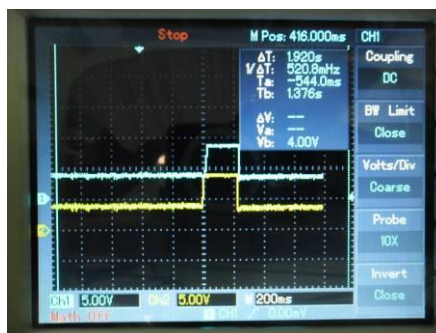


Figura 8: Bolhas Sinais Analógicos registrados devido à passagem da bolha pelo sensor duplo desenvolvido.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria necessita de instrumentos capazes de monitorar seus processos. Nem sempre é possível manter o controle apenas visualmente, como nos escoamentos em minerodutos ou caldeiras de flotação, sendo conveniente o uso de sensores para determinação da quantidade de cada uma das substâncias envolvidas. O sensor apresentado ao longo deste artigo vem a ser um dos instrumentos utilizados nessas medições. Sua função principal é ser o receptor dos sinais gerados pela diferença de condutibilidade elétrica no meio bifásico. A intrusividade é um fator a ser considerado tanto na elaboração quanto na determinação do erro que este fornece às medições. Por isso, deve-se construí-lo fino o suficiente tanto para ser rígido como bem isolado. Os resultados mostram que o sensor consegue representar de maneira adequada a fase gasosa do escoamento, e um método de calibração adequado poderá permitir uso confiável destes sensores para medição de parâmetros em escoamento bifásico, tais como tamanho de bolhas e suas velocidades.

Agradecimento

Os autores agradecem o financiamento da PROPES/UFPA para o desenvolvimento deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- COSTA, E. C. F.; SASSIM, N. A.; FRANÇA, F. A. *Caracterização do escoamento intermitente vertical com sonda condutiva intrusiva*. 4º PDPETRO, Campinas, SP, out. 2007. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_2_3_0290-1.pdf>. Acesso em: 10 de set. de 2011.
- RIBEIRO, Marco Antônio. *Metrologia industrial: fundamentos da confirmação metrológica*. 6ª Ed. Salvador, 2004.
- SILVA, M. O. et al. *Análise de técnica de sensores duplos de condutividade para a obtenção da velocidade e do tamanho de bolhas usando filmagem de alta velocidade*. XXXIII Congresso brasileiro de sistemas particulados—ENEMP. Aracaju: 2007.
- BARBOSA, J. R. (1997), “O método dos senores eletro-resistivos aplicado à pluma de bolhas”. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 112p.
- BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G. (1966), “Measurements and Analysis of Random Data”, John Wiley & Sons Inc., New York.
- CASTILLEJOS, A. H. e BRIMACOMBE, J. K. (1987), “Measurement of Physical Characteristics of Bubbles in Gas-Liquid Plumes: Part I. An Improved Electroresistivity Probe Technique”. *Metallurgical Transactions B*, Vol. 18bB, pp 649.

HOFFER, M. S. e RESNICK, W. (1975), "A Modified Electroresistivity Probe Technique for Steady and Unsteady-State Measurements in Fine Dispersions - I". Chemical Engineering Science, Vol. 30, pp 473-480.

GUPTA, P., MUTHANNA, H. A., MILORAD, P. D., PATRICK, L.M. (2000), "A novel signal filtering methodology for obtaining liquid phase tracer responses from conductivity probes", Flow Measurement and Instrumentation, Vol 11, p.123-131.

ISHII, M. e WU, Q. (1999), "Sensitivity study on double-sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow". Int. J. Multiphase Flow, Vol. 25, pp 155-173.

JONES, O. C. e ZUBER, N. (1975), "The Interrelation Between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow". Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp 273-306.

MUÑOZ-COBO, J. L. et Al. (2007), "Monte-Carlo calculation of the calibration factors for the interfacial area concentration and the velocity of the bubbles for double sensor conductivity probe". Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, pp 484-496.

ZAHO, D. et Al. (2005), "An experimental study on local interfacial area concentration using a double-sensor probe". Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp 1926-1935.

INSTRUCTIONS FOR THE PREPARATION AND SUBMISSION OF PAPERS TO BE PUBLISHED IN THE PROCEEDINGS OF THE XL BRAZILIAN CONGRESS ON ENGINEERING EDUCATION

Abstract: *This paper presents the steps of constructing a conductivity sensor for measuring flow in which biphasic rise of bubbles occurs. In construction, acupuncture needles are used for the sensor body due to physical characteristics of rigidity and anti corrosion. Throughout the entire length of the needle groove is made to improve the grip and which is set if the size of the sensor. A thread is wound partially bare torch and soldier. The coating mixture of chloroform and insulating ink, isolates the metal tip is exposed and picks up signals transmitted through the conductor / insulator. This procedure aims to build a sensor through which one can obtain experimental data in bubble columns, flotation processes, pipelines etc.. For this, it is important to carefully every step of the construction in order to ensure a sensor that provides satisfactory results with minimal intrusiveness in the system and characterization of the sensor is properly avalaiado as its dimensional uncertainty.*

Key-words: *Sensors eletroresistivos, Two phase flow, uncertainty analysis, measurement errors.*